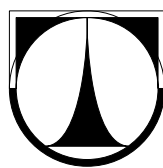


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

LIBEREC 2007

ZUZANA VAŠÍČKOVÁ



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

Studijní obor: Oděvní technologie 3106T005

Zaměření: Řízení technologických procesů

**Ověření technologie mikrovlnného ohřevu
plošných útvarů pomocí stojaté vlny**

**The verification of the microwave heating of
planar objects with the standing wave technology**

Diplomant: Zuzana Vašíčková

Vedoucí práce: Prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

Konzultant: Ing. Miroslava Maršálková

Rozsah práce:

počet stran textu	82
počet obrázků	48
počet tabulek	26
počet příloh	3

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra elektrotechniky

Školní rok:2006/2007

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: **Zuzanu Vašíčkovou**
obor: **Oděvní technologie**
zaměření: **Řízení technologických procesů**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Ověření technologie mikrovlnného ohřevu plošných útvarů pomocí stojaté vlny**

Zásady pro vypracování :

1. Seznamte se s řešením projektu (Truhlář, M.; Novák, P.: Mikrovlnný ohřev plošných útvarů pomocí stojaté vlny ve vlnovodu, FM TUL, 2006) a vypracujte teoretický rozbor zaměřený na energetické účinky elektromagnetického pole.
2. Navrhněte vhodné úpravy funkčního modelu, tak aby bylo zajištěno bezpečné vkládání textilu do štěrbin vlnovodu.
3. Ověřte funkci na vybraných vzorcích textilu.
4. Vypracujte technologickou příručku včetně bezpečnostních zásad pro další využití v laboratoři FT.
5. V závěru uveďte rozbor možností použití tohoto principu v průmyslu (nejen v textilním).

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran včetně příloh, dokumentace a elektronické verze DP.

Seznam odborné literatury:

[1] Sedlák, B. ; Štoll, I. : Elektřina a magnetismus, Academia, Praha 2002

[2] Vrba J. : Studie mikrovlnného ohřevu pomocí postupné vlny, Výzkumná zpráva, TUL Liberec VCT II., FEL, ČVUT Praha, 2005

[3] Turek, B.: Experimentální pracoviště pro ověřování vlivu vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, diplomová práce, FM, KEL, TUL 2003, Liberec

[4] Dvořáková, D.: Možnosti použití vysokofrekvenčního elektromagnetického pole v textilní technologii, diplomová práce, KEL, FM, FT, TUL 2003, Liberec

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

Konzultant: Ing. Miroslava Maršálková

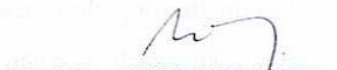
Zadání diplomové práce: 14. 10. 2006

Termín odevzdání diplomové práce: 14. 5. 2007




Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

vedoucí katedry


Prof. Ing. Jiří Militký, CSc.

děkan FT

V Liberci dne 14. 10. 2006

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 14.5. 2007

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěla poděkovat Prof. Ing. Aleši Richterovi CSc. za trpělivé a obětavé vedení a Ing. Miroslavě Maršálkové za rady a připomínky, které mi při realizaci této diplomové práce vždy s ochotou poskytovala.

Za vstřícnost a ochotu projevenou při navrhování experimentů děkuji Ing. Marice Pourové, Ing. Jarmile Studničkové, Ing. Milanu Stejskalovi CSc. a Ing. Michaelle Dudíkové. Dále pak Martinu Truhlářovi za pomoc při obsluze použitého zařízení.

V neposlední řadě děkuji své rodině za vytvoření potřebného zázemí pro mé vysokoškolské studium.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá ověřením funkčnosti prototypu zařízení, které bylo realizováno ve spolupráci s ČVUT FEL. Toto zařízení využívá elektromagnetického záření o frekvenci 2,45 GHz a bylo zkonstruováno za účelem ohřevu plošných útvarů, zvláště pak textilních materiálů.

Úvodní část práce se zabývá rozбором teorie elektromagnetického pole a procesu sušení. Dále byla vypracována technologická příručka - seznam doporučení pro obsluhu zařízení.

Následně byly realizovány experimenty. Bylo změřeno vyzařování soustavy do okolí a zmapována tepelná pole materiálu po ohřevu. Dále byly zjištěny sušící křivky textilních materiálů a byl simulován jejich posun. Okrajově byla také vyzkoušena možnost využití zařízení pro finální úpravy textilií.

V závěrečné části byly experimenty vyhodnoceny a navrženy možnosti konstrukčních zlepšení prototypu zařízení.

ANOTATION

The objective of this diploma thesis is to verify the functionality of the prototype, which was constructed in cooperation with CVUT FEL. This machine uses an electromagnetic field at the frequency of 2,45GHz and was designed for heating planar objects, especially textile materials.

The first section analyzes the theory of the electromagnetic field and the process of drying. Furthermore, a guide handbook was written with a list of recommendations on how to use this prototype.

The following section describes the execution of the experiments. After the heating of the materials, the measurements of the machine emissions to the outside were taken and thermic fields of the materials were mapped. Additionally, the drying curves were taken and their movement was simulated. Further, the possibility of using the machine for final adjustments of textiles was also tested.

In the final section, the experiments were evaluated, and design changes were suggested to improve the prototype.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetické pole	- Electromagnetic field
Mikrovlnné sušení	- Microwave drying
Mikrovlnný ohřev	- Microwave heat
Textilní materiály	- Textile materials
Frekvence	- Frequency
Mikrovlnná trouba	- Microwave oven
Vlnovod	- Waveguide
Plošný útvar	- Planar object
Stojatá vlna	- Standing wave
Sušicí křivka	- Drying curve

Obsah:

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ:	9
1. ÚVOD	10
2.1 ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM	11
2.2 MAXWELLOVY ROVNICE	13
2.3 MATERIÁLOVÉ VZTAHY	14
2.3.1 Materiálové konstanty	14
2.3.2 Permittivita	15
2.3.3 Vlnová rovnice	16
2.4 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	17
2.4.1 Stojatá vlna	18
2.4.2 Interakce elektromagnetické vlny s materiálem	19
2.5 ÚČINNOST ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	21
3. SUŠENÍ MATERIÁLU	22
3.1 VÁZÁNÍ KAPALINY V MATERIÁLU	22
3.2 STATIKA A KINETIKA SUŠENÍ	22
3.3 MIKROVLNNÝ OHŘEV	24
3.4 MIKROVLNNÉ SUŠENÍ	25
4. POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVISTĚ	29
4.1 MAGNETRON	29
4.2 VLNOVODOVÝ APLIKÁTOR	30
4.3 CELKOVÁ SOUSTAVA	32
5. TECHNOLOGICKÁ PŘÍRUČKA	34
5.1 OVLÁDÁNÍ MIKROVLNNÉ TROUBY	34
5.2 OPATŘENÍ TÝKAJÍCÍ SE VLNOVODŮ	36
5.3 HYGIENICKÉ NORMY	38
5.3.1 Hygienické veličiny	39
5.3.2 Hygienické normy v ČR	40
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
6.1 VYZAŘOVÁNÍ SOUSTAVY	41
6.2 MAPOVÁNÍ TEPELNÝCH POLÍ	42
6.3 SUŠÍCÍ KŘIVKY	50
6.3.1 Hodnocení vysušení vážením	50
6.3.2 Hodnocení vysušení obrazovou analýzou	66
6.4 SIMULACE POSUNU MATERIÁLU	68
6.4.1 Simulace posunu materiálu T_N	71
6.4.2 Simulace posunu materiálu TV	74
6.5 LEPTOVÝ TISK	76
7. ZÁVĚR	79
ZDROJE:	81

Seznam použitých zkratek a symbolů:

Zkratky:	
Ba	bavlna
ANSI	American National Standard Institute
NT	netkaná textilie
P10	100% celkového výkonu magnetronu
P5	50% celkového výkonu magnetronu
P3	30% celkového výkonu magnetronu
PES	polyester
T	tkanina
T _N	tkanina o nízké plošné hmotnosti
T _V	tkanina o vysoké plošné hmotnosti
Symbole:	
Elektrické a magnetické:	
ARD	Absorption Rate Density [W/m^3]
B	magnetická indukce [T]
D	elektrická indukce [C/m^2]
E	intenzita elektrického pole [V/m]
E _m	amplituda elektrického pole
E _{max}	nepřekročitelná hodnota intenzity elektrického pole [V/m]
f	vlnová frekvence [Hz]
H	intenzita magnetického pole [A/m]
H _m	amplituda magnetického pole
J	proudová hustota [A/m^2]
N	pyntingův vektor [W/m^2]
k	konstanta šíření vlny
P	činný příkon [W]
p	intenzita dopadajícího výkonu [W/m^2]
P _{max}	nepřekročitelná hodnota intenzity dopadajícího výkonu [mW/cm^2]
SAR	Specific Absorption Rate [W/kg]
α	činitel útlumu
β	fázová konstanta
ε	permitivita [F/m]
ε_r	relativní permitivita prostředí [-]
ε_0	permitivita vakua [$= 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$]
μ	permeabilita [H/m]

μ_r	relativní permeabilita prostředí [-]
μ_0	permeabilita vakua [$= 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m]
σ	měrná vodivost (konduktivita) [S/m]
ρ	objemová hustota náboje [C/m ³]
Ostatní:	
c	rychlost světla ve vakuu [$2,99792458 \times 10^8$ m/s]
h	tloušťka materiálu
m	hmotnost [g]
m_v	hmotnost kapaliny obsažené v materiálu [g]
m_s	hmotnost absolutně suché látky [g]
m_0	hmotnost suché látky [g]
m_X	hmotnost textilie bamočené na X-procentní vlhkost [g]
T	teplota [°C]
t	čas [s]
u	měrná vlhkost [-]
v	rychlost šíření rovinné vlny [m/s]
X	vlhkost obsažená v materiálu [%]
l	vlnová délka [m]
τ	čas [s]
ρ_s	plošná hmotnost [g/m ³]
ρ_v	objemová měrná hmotnost [g/m ³]
ω	úhlová rychlost [1/s]

1. Úvod

Poznatky o elektromagnetickém poli jsou známy od 19.století, základy teorie jsou spjaty se jménem J.C.Maxwell. Prvotní využití zaznamenaly mikrovlny ve vojenství, a to u radiolokátorů, později v komunikačních technologiích. Po druhé světové válce byl u elektromagnetického pole zjištěn dielektrický ohřev materiálů a nedlouho poté se objevily na trhu první mikrovlnné trouby.

Mikrovlnné záření má v dnešní době široké spektrum využití a je využíváno téměř v každém průmyslovém odvětví. Nejčastěji se setkáme s jeho využitím při ohřevu, rozmrazování a sušení široké škály materiálů. Už od roku 1994 se využívá v ČR mikrovln k sušení dřeva a po povodních v roce 2002 zaznamenal tento princip velký úspěch v sušení knih. V textilním průmyslu se mikrovlnné energie využívá při sušení, vybarvování textilií, fixaci barev, rozpojování balíků vlny a dokonce i čištění. Široké spektrum použití našly mikrovlny i v chemickém a farmaceutickém průmyslu. Dále se uplatnily například v restaurátorství, zemědělství, při zpracování gum, elastomerů, plastů, při výrobě kompozitů, ale také třeba v ekologii.

Průmyslové mikrovlnné sušičky pracují na různých principech. Lze je rozdělit do mnoha skupin podle konstrukce a podle sušeného materiálu. Rozlišujeme dva základní typy – aplikátor s rezonanční dutinou a aplikátor vlnovodový.

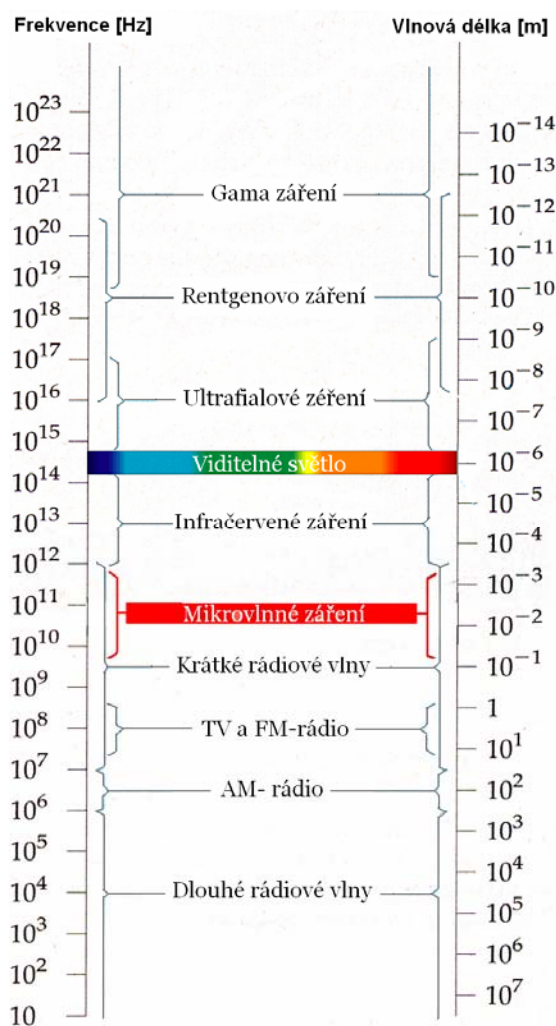
Pro vysoušení textilií byli v ČR vyvinuty a realizovány dva principy. První byl založen na principu otevřeného rezonátoru. Středem mezi dvěma odraznými deskami, kde vzniká stojaté vlnění, prochází textilie. Vlna dopadá kolmo na materiál, který prochází v jejím maximu intenzity elektrického pole.

Druhý typ byl založen na principu vlnovodového aplikátoru. Vlna, vyslána do vlnovodu, je směřována na hranu textilie, která prochází maximem intenzity elektrického pole. Tento princip skýtá mnohé možnosti pro testování a vývoj nových technologií úprav materiálů pomocí mikrovlnné energie. Prototyp zařízení, založeném na tomto principu, byl sestaven v minulém roce a je využíván v této práci.

2. Elektromagnetické pole

2.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické záření je šíření elektromagnetické energie prostředím, probíhá ve formě periodických vln. Je rozděleno na mnoho frekvencí a vzájemně se liší vlnovou délkou [11]. Toto dělení se nazývá elektromagnetické spektrum (viz. obr. 2.1). Obsahuje dlouhé rádiové vlny, mikrovlny, dále infračervené, viditelné ultrafialové, roentgenovo a gama záření. Přestože je dělení celkově přesné, někdy dochází k překrytí sousedních typů [12].



Obr. 2.1: Elektromagnetické spektrum [13]

V této práci se zabýváme mikrovlnami. Ty mají frekvence v intervalu 300 MHz až 300 GHz, a vlnové délky v rozsahu od 1 mm do 1 m. Samotné mikrovlnné pásmo se ještě dále dělí (viz. tabulka 2.1), přičemž se dá říci, že do něj patří i ultra krátké vlny.

Tabulka 2.1: Elektromagnetické spektrum [14]

český název	frekvence	vlnová délka	anglické označení
extrémně dlouhé vlny	0,3 - 3 kHz	103 - 102 km	Extremely Low Frequency (ELF)
velmi dlouhé vlny	3 - 30 kHz	102 - 10 km	Very Low Frequency (VLF)
dlouhé vlny (DV)	30 - 300 kHz	10 - 1 km	Low Frequency (LF)
střední vlny (SV)	0,3 - 3 MHz	1 - 0,1 km	Medium Frequency (MF)
krátké vlny (KV)	3 - 30 MHz	100 - 10 m	High Frequency (HF)
velmi krátké vlny (VKV)	30 - 300 MHz	10 - 1 m	Very High Frequency (VHF)
ultra krátké vlny (UKV)	0,3 - 3 GHz	1 - 0,1 m	Ultra High Frequency (UHF)
mikrovlny	3 - 30 GHz	100 - 10 mm	Super High Frequency (SHF)
mikrovlny	30 - 300 GHz	10 - 1 mm	Extremely High Frequency (EHF)
infračervené záření	1010 - 1014 Hz	1 mm - 1 mm	Infra Red (IR)
viditelné záření	1014 Hz	400 -900 nm	Visible (VIS)
ultrafialové záření	1014 - 1016 Hz	400 - 10 nm	Ultra Violet (UV)
rentgenovo záření	1016 - 1019 Hz	10 - 0,1 nm	X-Rays
gama záření	1019 - 1024 Hz	10^{-10} - 10^{-14} m	Gamma Rays

Mikrovlny jsou převážně využívány pro ohřev materiálů a v komunikačních technologiích. Pro mikrovlnný ohřev byly určeny frekvence 434 MHz, 915 MHz, 2,45 GHz a 5,8 GHz. Eliminuje se tak nebezpečí interference s telekomunikačními frekvencemi (navigace letadel, televizní vysílání, mobily atd.). V mikrovlnných troubách, se využívá frekvence 2,45 GHz. Vlna o této frekvenci má ve volném prostoru vlnovou délku 122,4 mm. Tato frekvence se jeví jako výhodná pro ohřev vody [15].

2.2 Maxwellovy rovnice

Popis teorie elektromagnetického pole vychází z Maxwellových rovnic. Je to soustava čtyř rovnic, obvykle zapisovaných v diferenciálním tvaru [1], [7]. Dále tvoří základ teorie materiálové vztahy.

První rovnice, Faradayův indukční zákon, popisuje elektromagnetickou indukci - při každé časové změně magnetického toku vzniká pole elektrické.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

Druhá rovnice, upravený Ampérův zákon, popisuje vznik magnetického pole v okolí vodiče protékaného proudem. K úpravě došlo zavedením posuvného proudu J_p proto, aby vyhovoval i nestacionárnímu poli.

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_p \quad (2)$$

Třetí rovnice je vyjádřením zřídlovosti elektrického pole – zdrojem elektrických polí jsou elektrické náboje. Nazývá se Gaussova věta elektrostatiky a je okrajovou podmínkou k Ampérovu zákonu.

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (3)$$

Čtvrtou rovnicí, Gaussovou větou magnetostatiky, vyjadřujeme nezřídlovost magnetického pole. Popisuje neexistenci zdroje magnetických polí a magnetických monopolů. Tato rovnice je okrajovou podmínkou k Faradayovu indukčnímu zákonu.

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4)$$

2.3 Materiálové vztahy

Na vlastnostech prostředí jsou závislé vztahy mezi proudy, náboji a vektory pole. Řešení Maxwellových rovnic, ve tvaru vyhovujícím nehomogennímu prostředí, vyžaduje znalost následujících materiálových vztahů [1]:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (7)$$

Dále je dobré znát obecné vztahy materiálových konstant ε , μ , σ [7],[16]:

$$\text{- Permittivita } \varepsilon [\text{F/m}] \quad \varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (8)$$

$$\text{- Permeabilita } \mu [\text{H/m}] \quad \mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (9)$$

- Měrná vodivost σ [S/m], jinak zvaná konduktivita

2.3.1 Materiálové konstanty

Podle charakteru parametrů ε , μ , σ lze prostředí rozdělit do několika skupin [3], [6]:

- ♦ *Lineární prostředí* je takové, kdy jsou parametry ε , μ , σ nezávislé na intenzitách elektromagnetického pole. Naopak je tomu v *nelineárním prostředí*.
- ♦ V *homogenním prostředí* jsou parametry ε , μ , σ ve všech bodech prostředí stejné, nejsou tedy funkcí polohy. V *nehomogenním prostředí* se materiály vyznačují plynulou nebo skokovou změnou vlastností.
- ♦ V *izotropním prostředí* nejsou parametry ε , μ , σ závislé na směru vektorů intenzit elektromagnetického pole, jsou skalárními veličinami. V *anizotropním prostředí* je nazýváme veličiny tenzorové.
- ♦ V *disperzním prostředí* závisí fázová rychlost vlny na její frekvenci. U *nedisperzního* je tomu naopak.
- ♦ *Bezztrátové prostředí* je takové, kdy parametry ε , μ , σ jsou reálné. Ve *ztrátovém prostředí* mají jednotlivé parametry komplexní tvar.

Vliv parametrů ε , μ , σ závisí nejen na intenzitě elektromagnetického pole ale i na vlastnostech materiálu kterým prochází. Například u kovů platí, že téměř vždy převládá měrná vodivost σ . U vody má měrná vodivost σ výrazný vliv pouze při nízkých frekvencích. Ve vysokofrekvenčním poli, které je využíváno v této práci, se nejvíce projevuje permitivita ε .

2.3.2 Permitivita

Permitivita je lineární koeficient úměrnosti mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole:

$$\varepsilon = \frac{\vec{D}}{\vec{E}}, \quad (10)$$

v isotropním a homogenním materiálu jde o jediné číslo, v komplikovanějších materiálech o matici koeficientů [16a].

Rozlišujeme tři druhy permitivity:

- ♦ *Permitivita vakua* ε_0 je hodnota stanovená dohodou:
 $\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
- ♦ *Relativní permitivita* ε_r (dříve zvaná dielektrická konstanta) vyjadřuje, kolikrát se elektrická síla zmenší, pokud jsou tělesa s elektrickým nábojem místo ve vakuu umístěna v látkovém prostředí. Je závislá na materiálu, fyzikálních podmínkách a frekvenci. V tabulce 2.2 jsou uvedeny vybrané hodnoty relativní permitivity.
- ♦ *Absolutní permitivita* ε je součin permitivity vakua a relativní permitivity podle vztahu (8).

Tabulka 2.2: Relativní permitivita vybraných látek měřená při frekvenci 100 Hz

Dielektrikum	ε_r	Poznámka
Voda	81	při 20°C
Porcelán	5,5 – 6,5	
Sklo	3,8 - 19	podle druhu skla
Plexisklo	3,4	
Vzduch	1,00059	

Permitivita reálného prostředí (materiálu) má komplexní tvar, je tvořena imaginární a reálnou složkou. Vztah platný pro permitivitu můžeme vyjádřit ve složkovém tvaru:

$$\vec{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' . \quad (11)$$

Chování elektromagnetického pole v materiálu je závislé na permitivitě materiálu, zvláště pak na složce imaginární. Čím větší je tato složka, tím je interakce materiálu a elektromagnetické pole silnější. Nejčastějším důsledkem této interakce je právě ohřev.

V příloze A jsou uvedeny grafy reálné a imaginární složky permitivit v závislosti na frekvenci pro materiály, které byly použity v experimentální části.

2.3.3 Vlnová rovnice

Šíření vlny prostorem popisuje vlnová rovnice pro harmonický průběh [17]. Je odvozena od nehomogenní Helmholtzovy vlnové rovnice upravené na homogenní tvar pro prostředí bez zdrojů:

$$\nabla^2 \vec{E} - k^2 \vec{E} = 0 . \quad (12)$$

Konstanta k se nazývá konstanta šíření. Obecně je definována vztahem

$$k = \beta - j\alpha , \quad (13)$$

kde β je fázová konstanta (mění fázi v prostoru) a α je činitel útlumu, jehož vlivem dochází k snižování amplitudy v prostoru. Z tvaru rovnice

$$k^2 = -j\omega\mu(j\omega\varepsilon + \sigma) \quad (14)$$

je patrná závislost na parametrech prostředí, kterými jsou permeabilita, permitivita a konduktivita.

Pomocí konstanty šíření lze odvodit fázovou rychlost a délku vlny. Ty se mění v závislosti na elektrických vlastnostech materiálu.

2.4 Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické záření je pole vektorové, je kombinací příčného postupného vlnění magnetického a elektrického pole. Vektory elektrického a magnetického pole jsou v každém bodě a v každém okamžiku k sobě kolmé a zároveň jsou oba kolmé ke směru pohybu vlny.

Všechny elektromagnetické vlny se ve vakuu pohybují rychlostí světla. Tato rychlost ve vakuu je dána permitivitou a permeabilitou vakua [7]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}}. \quad (15)$$

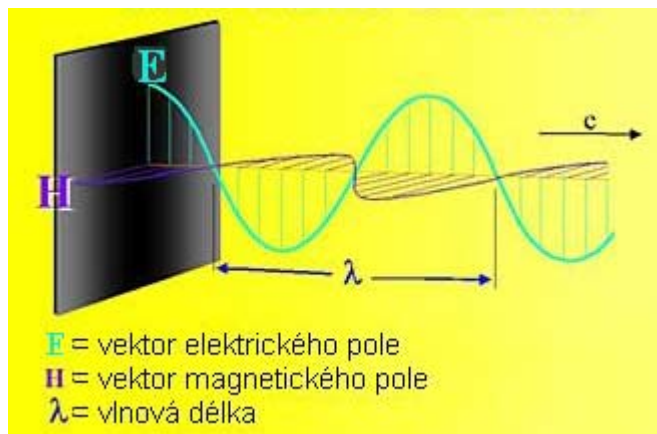
Amplitudy vln mají ve vakuu konstantní poměr, proto platí vztah:

$$c = f \cdot \lambda, \quad (16)$$

kde f je vlnová frekvence [Hz] a λ vlnová délka [m].

Rychlost šíření vlny lze také vyjádřit jako podíl okamžitých hodnot pole elektrického a magnetického:

$$c = \frac{E}{B}. \quad (17)$$



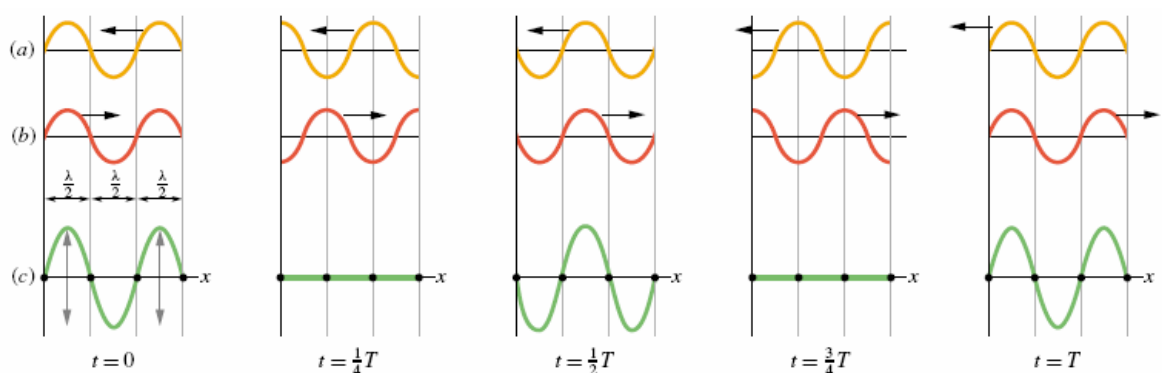
Obr. 2.2: Elektromagnetická vlna v beztrátovém prostředí [18]

K průběhu vlny na obrázku 2.2 dochází pouze v beztrátovém prostředí, tedy ve vakuu.

2.4.1 Stojatá vlna

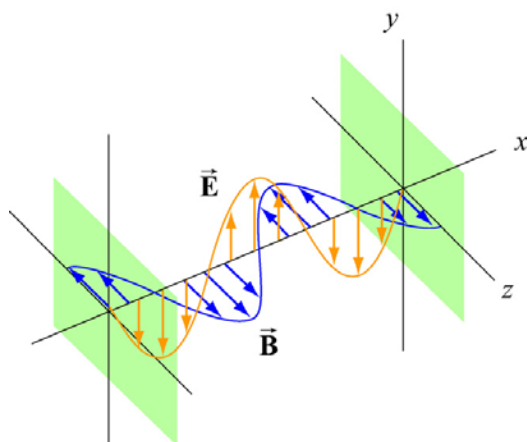
V soustavě používané v této práci generuje magnetron postupnou vlnu. Vlnovody jsou však ukončeny zkratem (viz. kapitola 4.2), jeho vlivem vzniká vlna stojatá.

Princip vzniku stojaté vlny (viz. obrázek 2.3) lze vysvětlit jako interferenci dvojice vln postupných, pohybujících se proti sobě ((a) a b)). Jejich součtem vznikne vlna stojatá ((c)) [7].



Obr. 2.3: Vznik stojaté vlny [7]

Hlavními znaky výsledné vlny jsou uzly a kmity. Uzly jsou místa, která jsou neustále v klidu. Naopak kmity jsou místa s největší amplitudou. Stojatá vlna se nepohybuje, polohy uzlů a kmitů se v čase nemění. Průběh stojaté vlny elektromagnetické je znázorněn na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Stojatá elektromagnetická vlna vytvořená pomocí dokonale odrazujících vodičů [19]

2.4.2 Interakce elektromagnetické vlny s materiálem

Mikrovlnné záření proniká většinou materiálů jako sluneční světlo sklem. Některými materiály je však silně pohlcováno, u jiných materiálů naopak dochází k odrazu mikrovln (využíváno v radarech) [21].

Při interakci elektromagnetické vlny s materiálem může dojít ke třem jevům (viz. obrázek 2.5):

- ♦ *Odraz* nastává při kontaktu s vodiči, především s kovy.
- ♦ *Transmise* nastává u nevodivců (isolátorů).
- ♦ *Absorpce* nastává při kontaktu s dielektriky.



Obr. 2.5: Interakce elektromagnetických vln s materiálem [20a]

Elektromagnetické vlnění se šíří v různých mediích. Odraz a lom mikrovln nastává na rozhraní dvou materiálů s rozdílnými dielektrickými vlastnostmi. Na těchto vlastnostech a na úhlu dopadu na plochu rozhraní je závislé množství odraženého a absorbovaného vlnění. Po průchodu do jiného materiálu dochází ke změně rychlosti vlny a její vlnové délky.

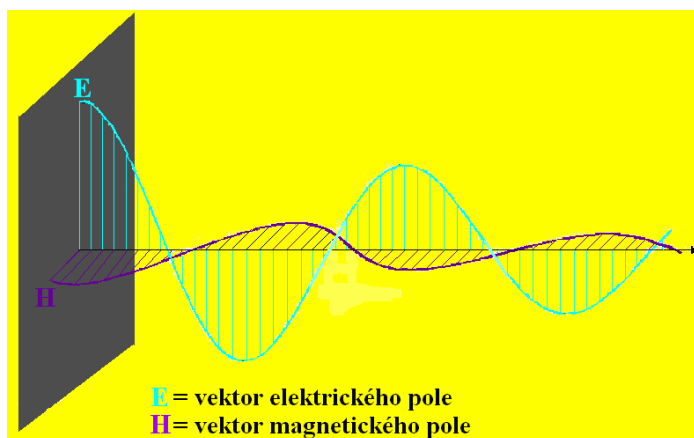
Při interakci elektromagnetického pole s materiálem dochází k absorpci vlnění, tedy k pohlcování energie vlnění. Tato pohlcená energie se pak mění především na teplo. Ztráty dělíme do tří skupin [3]:

- ♦ *Ztráty způsobené vodivostí látky*, také nazývané Jouleovy ztráty jsou způsobené proudy vyvolanými elektromagnetickým polem, hlavně u vodičů.
- ♦ *Polarizační ztráty* vznikají vzájemným třením molekul při polarizaci a podílí se na vzniku tepla nejvíce

- ♦ *Magnetizační ztráty* jsou způsobeny složitým mechanismem ztrát při magnetizaci. Pro případ ohřevu vody jsou tyto ztráty zanedbatelné.

Tyto tři složky se podílejí na ohřevu a vzniku tepla. V případě této práce je ohřev chtěný a dokonce požadovaný. Proto je název ‚ztráty‘ nepatřičný.

Při průběhu mikrovln reálným prostředím, zobrazeným na obrázku 2.6, dochází k absorpci mikrovln materiálem a amplituda vlny se snižuje.



Obr. 2.6: Elektromagnetická vlna ve ztrátovém prostředí

2.5 Účinnost elektromagnetického pole

Elektromagnetické vlny se v praxi využívají pro přenos energie. Při dopadu vlny na těleso se její energie předá a přemění se v jinou formu energie, nejčastěji právě v teplo. Intenzita elektromagnetického pole tedy přímo souvisí s ohřevem látky. Pomocí intenzity elektrického a magnetického pole se definuje plošná hustota výkonu čili vektor toku energie. Ten je znám jako Poyntingův vektor [1], [8]. Je definován jako energie procházející jednotkovou plochou za sekundu:

$$\vec{N} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad [\text{W/m}^2] \quad (18)$$

Vektory \vec{E} a \vec{H} jsou navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé k vektoru toku energie. Vektor \vec{N} udává směr šíření vlny a směr toku energie.

Při šíření vlny v kladném směru osy x , tedy vlny postupné, lze Poyntingův vektor zapsat ve tvaru [8]:

$$\vec{N} = \vec{E} \times \vec{H} = (jE_y + kE_z) \times (jH_y + kH_z) = j(E_y H_z - E_z H_y). \quad (19)$$

Pro složky H_y a H_z platí vztahy:

$$H_y = -\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_z (x - vt), \quad H_z = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_y (x - vt), \quad (20)$$

kde v je rychlost šíření rovinné vlny ve směru osy x , ta je ve vakuu rovna rychlosti světla.

Dále pro lineárně polarizovanou, netlumenou, harmonickou a postupnou vlnu platí, že složka ve směru osy x je rovna nule ($E_x=0$) a složky ve směru osy y a z , tedy E_y , E_z , popisují následující vztahy :

$$E_y = A \sin(\omega t - \alpha x), \quad E_z = B \sin(\omega t - \alpha x), \quad (21)$$

kde A a B jsou amplitudy složek, které jsou obecně různé ($A \neq B$).

Platí tedy:

$$\vec{N} = j \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} (A^2 + B^2) \sin^2(\omega t - \alpha x). \quad (22)$$

3. Sušení materiálu

Sušením rozumíme fyzikální děj, při kterém je odstraněna vlhkost obsažená v materiálu [23]. Je to děj difúzní, vlhkost přechází z vnitřní části na povrch materiálu a dále pokračuje ven do okolí povrchovým vypařováním. Tepelný způsob odstraňování vlhkosti je energeticky velmi náročný proces, a proto se hledají způsoby jak jej zefektivnit. Sušení je aplikace, u které se s výhodou dá využívat mikrovlnné energie [24].

3.1 Vázání kapaliny v materiálu

Rozlišujeme tři druhy vlhkosti:

- ♦ *Chemicky vázaná vlhkost* je součástí chemické stavby a udává se v přesných váhových poměrech. Při sušení se neodstraňuje, jinak by mohlo dojít k porušení struktury materiálu.
- ♦ *Fyzikálně vázaná vlhkost* je vlhkost kapilární, která se nachází v pórech a dutinách.
- ♦ *Mechanicky vázaná vlhkost* je vlhkost adhezní a smáčecí.

3.2 Statika a kinetika sušení

Podstatou sušení je přechod vlhkosti z pevné fáze na fázi plynnou. Tento proces je možný, pokud je tlak páry nad povrchem materiálu větší než parciální tlak v okolním prostředí [4].

Proces sušení má dvě fáze:

- ♦ Výměna vlhkosti a tepla mezi materiálem a prostředím, které jej obklopuje.
- ♦ Převod vlhkosti ve tvaru kapaliny nebo páry z vnitřních částí materiálu k povrchu.

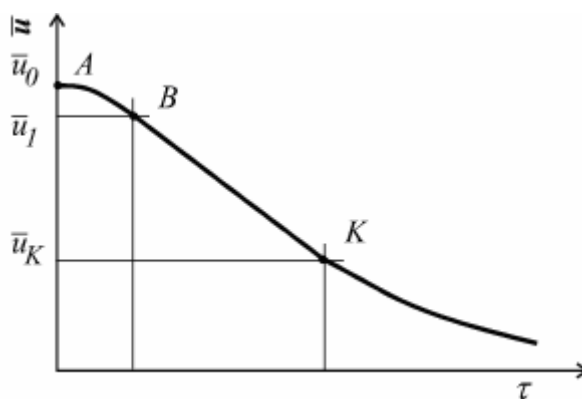
Statika sušení definuje vztah mezi počátečními a konečnými parametry látek, které se na procesu podílí. Stanovuje se pomocí rovnic materiální a tepelné bilance. Umožňuje určit složení materiálu, spotřebu sušícího prostředku (vzduchu) a tepla [4], [23].

Kinetika sušení definuje rychlost změny vlhkosti. Stanovuje vztah mezi změnou vlhkosti materiálu v čase a parametry procesu, jako jsou např. vlastnosti, struktura nebo

rozměry materiálu, podmínky proudění sušícího prostředí, typ zařízení atp. Kinetiku nejlépe popisuje křivka sušení [4], [23].

Křivka sušení:

Základní dynamická závislost (viz. obrázek 3.1) je vyjádřena střední měrnou vlhkostí sušeného materiálu jako funkcí času $\bar{u} = f(\tau)$.



Obr. 3.1: Křivka sušení v obecném tvaru[23]

Křivka sušení se dělí na 3 části. V úseku (AB) se nejdříve energie spotřebovává na ohřátí materiálu a v něm obsažené vody a k přeměně vody na páru. Poté následuje lineární část (BK), kdy je úbytek vlhkosti konstantní. Bod K se nazývá kritický bod a za ním se proces odpařování zpomaluje - povrchová vlhkost je odstraněna, ale vlhkost uvnitř materiálu nedospěla kapilárami k povrchu [23], [24].

Křivka sušení v obecném tvaru spíše zachycuje průběh při ohřevu materiálu konvenčním způsobem. Při mikrovlnném sušení se úsek (AB) neprojeví - ohřev materiálu a vody proběhne téměř okamžitě.

Vlhké materiály lze charakterizovat jako systém tvořený absolutně suchou tuhous látkou a kapalinou. Poměr kapaliny a absolutně suché látky materiálu vyjadřuje měrná vlhkost u [-]:

$$u = \frac{m_v}{m_s} \quad (23)$$

kde m_v [kg] je hmotnost kapaliny a m_s [kg] je hmotnost absolutně suché látky [23].

V našem případě vztah pro výpočet vlhkosti zjednodušíme. Veličinu m_s nahradíme hmotností suchého materiálu m_o [kg] při běžných klimatických podmínkách. Pro značení vlhkosti je zavedena veličina X [%], a platí pro ni vztah:

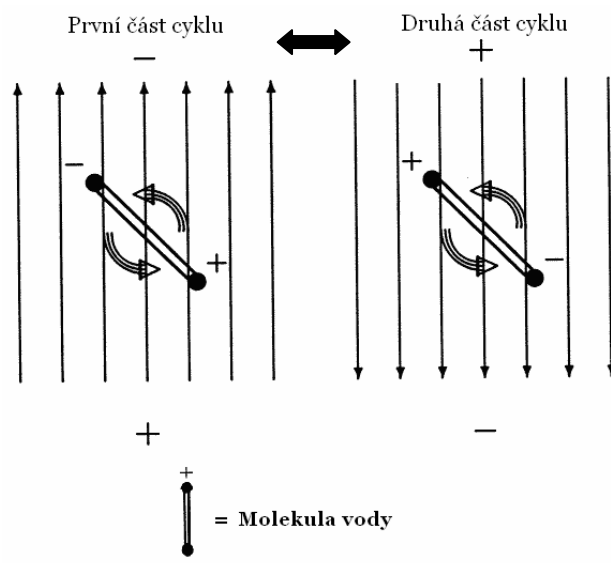
$$X = \frac{m_v}{m_o} \cdot 100 [\%] \quad (24)$$

Získali jsme sušící křivku, kde je vlhkost obsažená v materiálu závislá na čase $X = f(t)$. Ke zjištění závislosti nám tedy postačí znát hmotnost materiálu před sušením a hmotnost vody obsažené v materiálu během a po skončení sušení.

3.3 Mikrovlnný ohřev

Podstatou mikrovlnného ohřevu je přeměna energie střídavého elektrického pole na tepelnou energii. Schopnost silně pohlcovat mikrovlnné záření mají polární látky, např. voda. Pole působí na polární molekuly, které se běžně nachází v neuspořádaném stavu.

V elektromagnetickém poli se dipóly molekul natáčí podle jeho směru (viz. obrázek 3.2). Pole je střídavé a proto dochází k neustálému pohybu molekul, které se snaží změnám přizpůsobit a zaujmout energeticky nejvýhodnější pozici. Orientují se zápornou částí ke kladnému pólu a kladnou k zápornému. V mikrovlnném poli se polarita mění $2,45 \cdot 10^9$ krát za sekundu a polární molekuly se snaží tyto rychlé změny sledovat. Vlivem pole dochází k velmi rychlému pohybu molekul, to má za následek vzájemné mezimolekulární tření, srážky molekul. Výsledkem je přeměna mikrovlnné energie na teplo [21], [22].



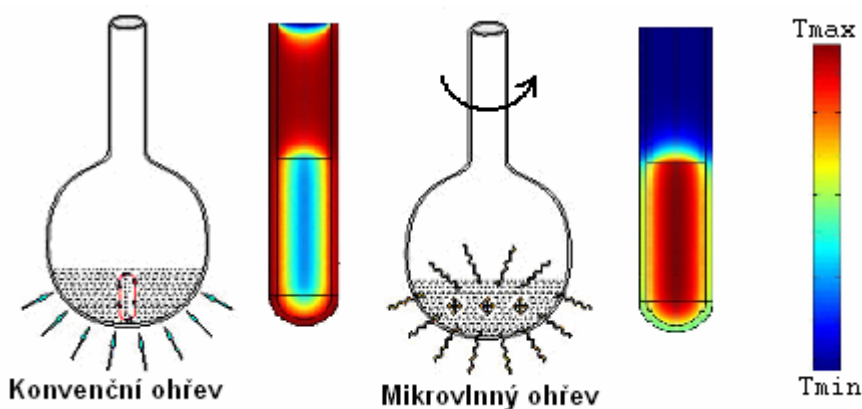
Obr. 3.2: Dipólová polarizace molekuly vody [22]

Množství energie přeměněné v teplo je závislé na frekvenci mikrovln a na intenzitě elektromagnetického vlnění.

3.4 Mikrovlnné sušení

Princip sušení materiálu je řízen dvěma mechanismy. Jde o vedení tepla a pohyb hmoty. Mezi konvenčním sušením a mikrovlnným je zásadní rozdíl v tom, jak se tyto mechanismy pohybují vůči sobě [4], [6] (viz. obrázek 3.3):

- ♦ U *konvenčního sušení* se teplo pohybuje dovnitř materiálu zvenčí a vlhkost směřuje proti teplu, tedy směrem zevnitř ven.
- ♦ U *sušení mikrovlnného* je teplotní profil opačný. Materiál je zahříván uvnitř a teplo, stejně jako vlhkost, směřuje zevnitř ven. Nejvyšší teplota je uvnitř materiálu a klesá směrem k povrchu.



Obr. 3.3: Porovnání mechanismů sušení [20b]

Mikrovlnné sušení je velmi efektivní, neboť přes 90% vstupující mikrovlnné energie se přemění na teplo. Podobnou účinnost nelze jiným způsobem ohřevu dosáhnout. Je to dáno tím, že voda, jakožto vysoce polární materiál, velmi dobře absorbuje mikrovlnou energii.

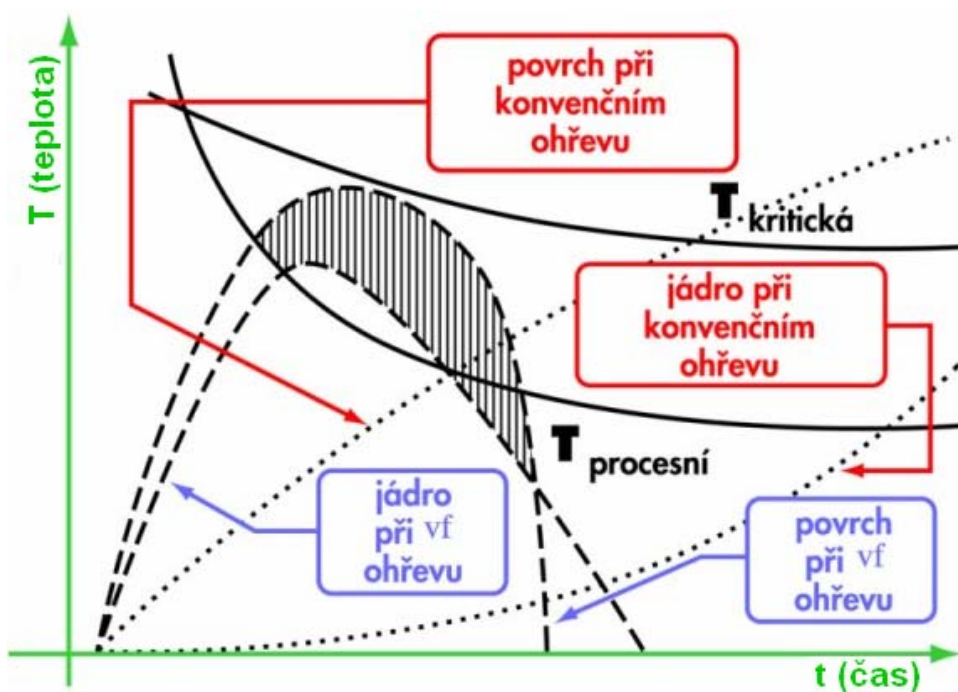
Problémem u konvenčního sušení je, že se nejdříve vysouší povrch materiálu. Ten pak hůře propouští dovnitř teplo a dochází k uzavření kapilár, kterými je ven odváděna vlhkost. Proto existuje nebezpečí, že vrchní vrstva se může přehřívat, ale uvnitř materiálu bude uzavřena nežádoucí vlhkost. Naopak u mikrovlnného sušení teplo směřuje z jádra materiálu, nedochází tedy k přesušení povrchu, protože ten je neustále vlhký vlivem odcházejících par [15a].

Mikrovlny působí téměř výhradně na molekuly vody a naopak mají minimální účinek ve zcela suchých oblastech v produktu. Toto je výhodou pro vyrovnaní vlhkosti v produktu, jestliže je před zpracováním nerovnoměrná [15a], [24]. Naproti tomu u mikrovlnného sušení může docházet k nerovnoměrnosti sušení vlivem místně proměnlivého mikrovlnného pole. To má za následek lokální rozdíly v intenzitě sušení. V sušších místech může dojít k degradaci materiálu vlivem přesušení. Proto je třeba, aby se materiál při sušení pohyboval, stejně jako je tomu v mikrovlnných troubách, kde je právě z tohoto důvodu otočný talíř.

Při sušení plošných útvarů pomocí mikrovln je rozdílná absorpce energie u tenkých a silných materiálů. Čím více materiálu je ohříváno, tím je množství absorbované energie větší, vzniká tedy problém u velmi tenkých tkanin [4]. Samotná vazba tkanin

(popř. pletenin) nevykazuje ve všech místech jednotnou tloušťku materiálu a je tedy značně nehomogenní. To může mít za následek nestejnoměrnost vysoušení.

Porovnání výhodnosti mikrovlnného sušení oproti konvenčnímu je uvedeno v grafu na obrázku 3.4. Znázorňuje homogenitu a rychlost průběhu mikrovlnného ohřevu. Z grafu je patrné, že v době kdy je vysokofrekvenční ohřev (vf) ukončen, u konvenčního způsobu se teplota jádra nedostala ještě ani na pracovní teplotu. Povrch už je přitom v oblasti, kde dochází k jeho přehřívání. Je třeba podotknout, že tento graf má pouze orientační charakter a neodpovídá tedy žádné konkrétní frekvenci.



Obr. 3.4: Porovnání mikrovlnného sušení s konvenčním ohřevem [15b]

Stručně se dají shrnout poznatky o mikrovlnném sušení do následujících bodů. Obecně se mikrovlnné sušení se vyznačuje [6], [24]:

- ♦ vysokou energetickou účinností a rychlým odvodem vody
- ♦ úsporou energie – nevznikají energetické ztráty vlivem ohřevu sušícího prostředí
- ♦ kratší dobou procesu, až o 70%
- ♦ velmi přesným řízením tepelných dávek

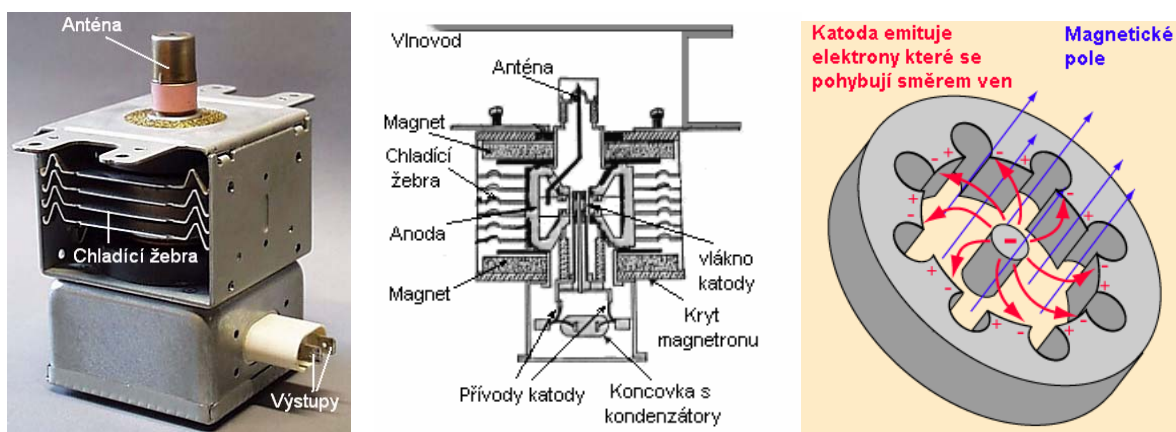
- ♦ u teplotně labilních materiálů nedochází k degradaci důležitých složek (vitaminy, silice apod.) a tím se nemění ani senzorické vlastnosti
- ♦ ve většině případů je zajištěn současně i devitalizační účinek na mikrobiální patogenní činitele
- ♦ snížením nákladů a nároků na prostor
- ♦ zajištění hygienického prostředí – minimum prachu, hluku, vibrací apod.

4. Popis experimentálního pracoviště

Model vychází z návrhu podle [2]. Původně bylo zařízení navrženo jako soustava o jedné mikrovlnné troubě a jednom aplikátoru. Později se model rozrostl o další jednotku, umístěnou zrcadlově k té původní. V mikrovlnné troubě je zdrojem vysokých výkonů magnetron. Na něj navazuje aplikátor, v tomto případě vlnovodový, který slouží k vedení elektromagnetického záření.

4.1 Magnetron

Magnetron je mikrovlnná elektronka, používaná na generování vysokých výkonů řádově stovek wattů. Je schopen generovat elektromagnetické vlnění v oblasti mikrovln, které má v případě mikrovlnné trouby frekvenci 2,45 GHz a vlnovou délku ve vakuu 122,4 mm. V magnetronu dochází k interakci elektronů s vysokofrekvenčním polem v celém vnitřním prostoru [5], [6], [25], [29]. Fotografie magnetronu, jeho konstrukce a podstata jsou zobrazeny na obrázku 4.1.



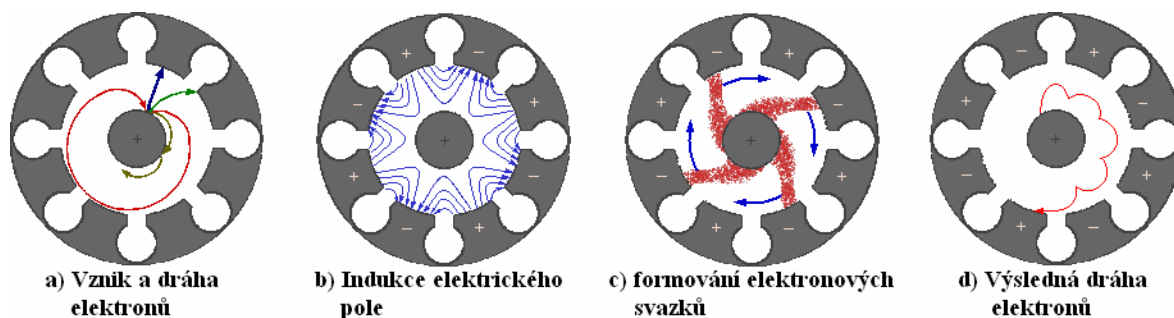
Obr 4.1: Magnetron [26],[27],[28]

Konstrukce magnetronu je poměrně jednoduchá [25]:

Uvnitř vakuované trubice se nachází kovový váleček - katoda, která je obklopena kovovým blokem – anodou. Ta má komorovou strukturu, vytváří sudý počet dutinových rezonátorů. Od anody vede kovový pásek - anténa. K trubici jsou připevněna hliníková chladicí žebra a celá trubice je vložena mezi dva silné feritové magnety.

Princip funkce magnetronu je naopak složitější [25]:

Katoda vysílá elektrony, ty jsou elektrickým polem urychlovány směrem k anodě a vlivem magnetů se jejich pohyb stáčí směrem doleva. Elektrony nabíjí jeden okraj komory a proud začne procházet kolem na okraj druhý. Celý princip je patrný z obr. 4.2.

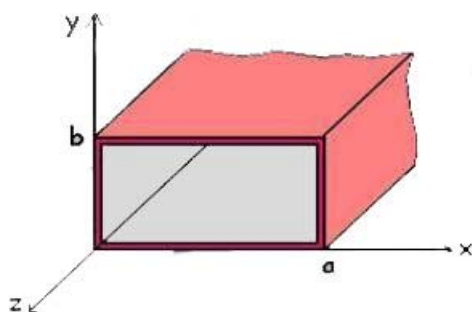


Obr 4.2: Pohyb elektronů v magnetronu [29]

Průchod proudu vytvoří magnetické pole a to poté indukuje opačný proud komorou. V komorách tak vzniká střídavý proud vysoké frekvence (2,45 GHz).

4.2 Vlnovodový aplikátor

Účelem aplikátorů je vyzářit a směřovat, s co největší účinností, energii zdroje, aby se co nejvíce energie absorbovalo v materiálu. Vlnovodový aplikátor pracuje na principu vedení materiálu místem s největší intenzitou elektrického pole. Vyznačuje se minimálním vyzařováním energie do okolního prostoru a umožňuje přenos velkého výkonu s minimálními ztrátami energie [5], [6]. Obecně mohou mít vlnovody libovolný tvar příčného průřezu, v našem případě je použit vlnovod obdélníkový (viz. obrázek 4.3).



Obr 4.3: Obdélníkové vlnovodné aplikátory [30], [31]

U tohoto typu aplikátorů je přímá závislost mezi kmitočty a rozměry vlnovodu. Rozměry vlnovodu, navrženého pro zařízení použité v této práci, jsou patrné z obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Navržený vlnovod [9]

Vlnovod W1: 80 x 40 mm

Vlnovod W2, W3: 80 x 80 mm, W3 zakončen zkratem

Otvor pro vkládání textilie - šěrčina: 20 x 450 mm

Tloušťka plechu: 2 mm

Mezi vlnovody W2 a W3 je šíře plechu 2 x 2mm. Vlnovod W1 je přímo napojen na magnetron mikrovlnné trouby ve vzdálenosti 19,5mm. Příruba (3) slouží ke spojení kónusového přechodu (1) k dutině mikrovlnné trouby[9].

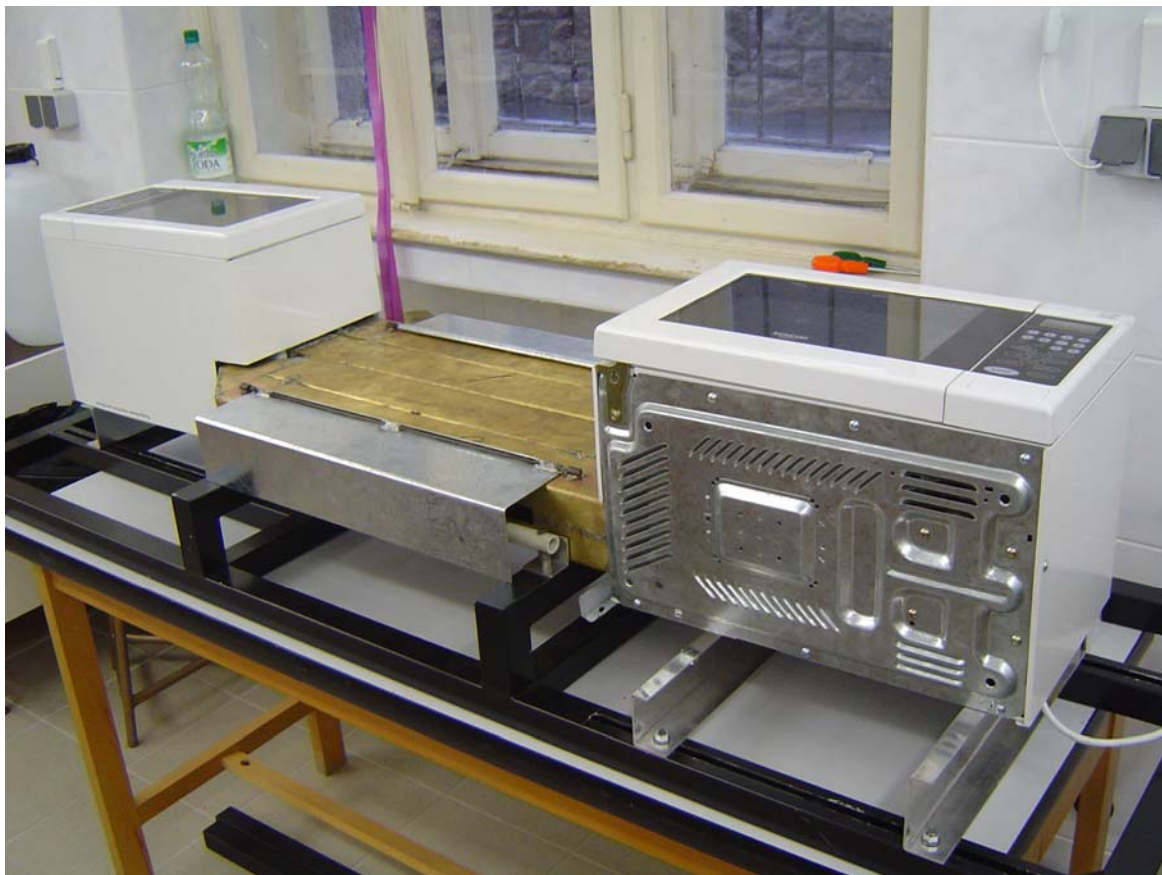
Materiál, procházející dvěma vlnovody (W2 a W3), je dokonaleji vysušen právě v oblasti kmiten. Ve vlnovodu W2 dojde k vysušení v maximech elektromagnetického pole, ale materiál zůstane vlhký v jeho minimech. Ty se dosuší až ve vlnovodu W3, kde se budou nacházet v oblasti maxim.

Jak už bylo napsáno výše, z magnetronu vychází vlna o vlnové délce 122,4mm. Vlivem působení vlnovodu se ale vlnová délka prodlouží na 190mm.

4.3 Celková soustava

Fotografie soustavy, složené ze dvou jednotek umístěných zrcadlově, je na obrázku 4.5.

Tato soustava je umístěna na rámu, který umožňuje posun jednotek vůči sobě. U vstupní i výstupní štěrby vlnovodu jsou vodící válce. Je důležité aby materiál procházel středem vlnovodu, místem s největší intenzitou elektromagnetického pole, proto jsou válce výškově nastavitelné.



Obr. 4.5: Celková soustava

Celé zařízení je vypracováno tak, aby nedocházelo k únikům záření do okolí. Konstrukce mikrovlnné trouby byla upravena minimálně - byl do ní vyřezán otvor pro vedení vlnovodu. Ten je, jak je patrné z obrázku 4.6, napojen přírubou přímo na dutinu mikrovlnné trouby. Tedy by tedy k žádným únikům docházet nemělo.



Obr. 4.6: Napojení vlnovodu na mikrovlnnou troubu

Vnitřní prostor vlnovodu, kde se nachází elektromagnetické záření, je uzavřen stěnou z vodivého materiálu. Ta mikrovlnné záření odráží.

Jedinou otevřenou částí vlnovodu je tedy štěrbina pro vkládání materiálu. Byla navržena s podmínkou minimálního úniku mikrovln. Tato podmínka udává, že šířka štěrbiny je maximálně rovna $\lambda/4$. I přesto, že tomuto parametru rozměry vyhovují, teorie a praxe se zde rozcházejí. K únikům přece jen dochází a hrozí tak riziko ozáření obsluhy. Proto, k zajištění její bezpečnosti, byl otvor pro vkládání materiálu opatřen krytem z hliníkového plechu. Ten je ve tvaru písmene L a je umístěn na pantech, zajišťujících možnost odklopení.

Materiál je do zařízení vkládán pomocí podávací desky. Ta je složena z rámu a roštu. Rám je vyroben z plexiskla, jeho tloušťka je cca 3mm. Šířka vnitřních stěn rámu je 15 mm, vnější stěny jsou z důvodu pevnosti širší. Na rošt byla použita sklovláknitá mřížka, ve stavebnictví známá pod názvem Perlinka. U ní je využito výhody, že sklo se k elektromagnetickému záření chová jako izolant, tedy, že jím mikrovlny procházejí.

5. Technologická příručka

Práce na zařízení podléhá určitým pravidlům týkajících se obsluhy mikrovlnných trub, vlnovodů a použitého materiálu. Pro správnou funkci zařízení je dobré se těmito doporučeními řídit.

5.1 Ovládání mikrovlnné trouby

V tomto zařízení byly použity dvě mikrovlnné trouby značky Sencor, typ SMW 3417, jejichž *technické specifikace* jsou:

Síťové napětí: 230V – 50Hz

Jmenovitý příkon:1200W

Mikrovlnný výkon: 700 W

Frekvence: 2450 MHz

Váha netto:..... Přibližně 12,2kg

Hlučnost:..... 57dB

Trouby jsou opatřeny digitálním ovládacím panelem, který obsahuje tyto ovládací prvky:

Displej - zobrazuje čas ohřevu, nastavenou úroveň výkonu a hodiny.

Numerická tlačítka (0-9) - slouží k nastavení času nebo výkonu.

Time - nastavení doby ohřevu. Nastavení je možné do 99 minut a 59 sekund.

Power - toto tlačítko slouží k nastavení výkonu trouby.

Express - spuštění trouby v režimu výkonu HIGH (100%-ní výkon) v přednastavených časech.

Cancel – slouží ke zrušení nastavené úrovně výkonu a času.

Start - stiskem tohoto tlačítka bude zahájen ohřev.

Ostatní tlačítka pro naše využití nenašla uplatnění a je tedy zbytečné je popisovat.

Pozn.: Režim EXPRES, ve kterém magnetron pracuje vždy na plný výkon (100%), má v sobě naprogramovanou volbu času ohřevu. Každým stiskem tohoto tlačítka dojde k nastavení času postupně na 15s, 30s, 1min., 2min.

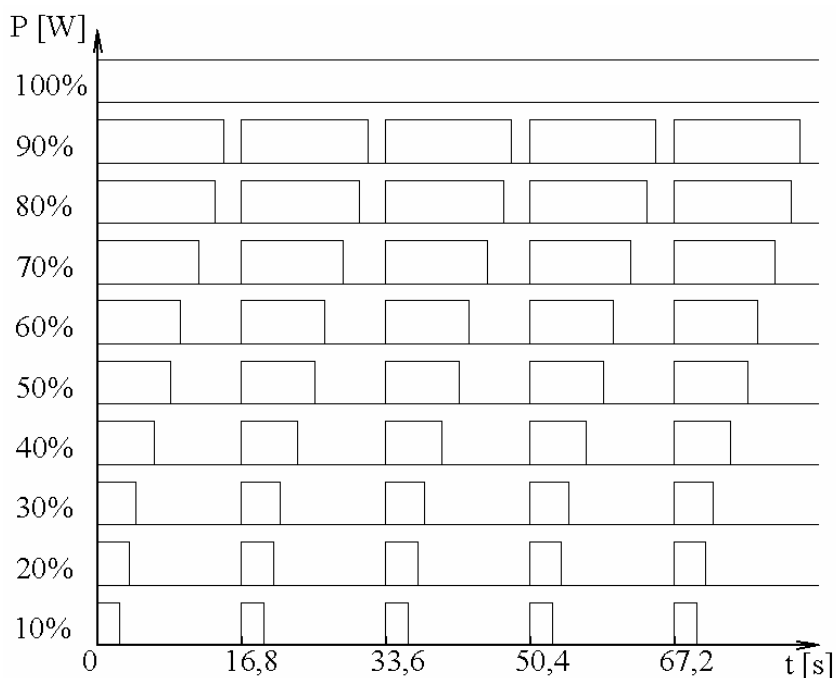
Nastavení doby ohřevu a úrovně výkonu trouby probíhá následujícím postupem:

- 1) Stisknutím tlačítka TIME aktivujeme jeho volbu a navolením na numerické klávesnici nastavíme dobu ohřevu.
- 2) Chceme-li vložit jinou úroveň výkonu trouby než 100%, stiskneme tlačítko POWER a opět na numerické klávesnici vložíme požadovaný výkon trouby (1-9).
- 3) Stisknutím tlačítka START zahájíme ohřev.

Magnetron v mikrovlnné troubě pracuje na různé úrovni výkonu. To je zajištěno střídavým vypínáním a zapínáním magnetronu, které je dáno podle procentuelního výkonu. V tabulce 5.1 jsou uvedeny procentuelní výkony a jim odpovídající klávesy na ovládacím panelu. V druhém sloupci jsou časy zapínání a vypínání magnetronu [9]. Na obrázku 5.1 je znázorněn průběh pulzního režimu magnetronu, ze kterého je patrné jeho zapínání a vypínání v rámci časové periody 16,8 s.

Tabulka 5.1: Procentuelní výkon a jemu odpovídající klávesa, čas chodu magnetronu

výkon [%] / klávesa	magnetron- on/off [s]
90 / 9	14,7 / 2,1
80 / 8	13,6 / 3,2
70 / 7	11,7 / 5,1
60 / 6	9,7 / 7,1
50 / 5	8,5 / 8,3
40 / 4	6,6 / 10,2
30 / 3	4,5 / 12,3
20 / 2	3,5 / 13,3
10 / 1	2,6 / 14,2



Obr. 5.1: Průběh pulzního režimu magnetronu [9]

5.2 Opatření týkající se vlnovodů

Před samotným spuštěním zařízení je dobré se přesvědčit o následujících možnostech nebezpečí a přečíst si doporučení:

- Nepoužívejte toto zařízení, je-li poškozen napájecí kabel nebo zástrčka napájecího kabelu a v případě, že trouby nefungují správně. Je-li napájecí kabel poškozen, musí být vyměněn k vyloučení rizika zásahu elektrickým proudem.
- Neinstalujte soustavu, obzvláště mikrovlnné trouby, do blízkosti zařízení produkující teplo. Pokud je na toto místo nainstalujete, mohou se trouby poškodit.
- Dbejte na to, aby elektrická zásuvka byla přístupná i po instalaci zařízení.
- Nedovolte, aby došlo k zvlhnutí ovládacího panelu.
- Nezapínejte zařízení (mikrovlnné trouby), jsou-li vlnovody prázdné.
- Toto zařízení je určeno pouze k ohřevu a sušení plošných útvarů. Rozměry vzorků jsou omezené velikostí štěrby, tedy maximálně 20mm x 450mm.

- Vlnovody musí být udržovány v čistotě. Nečistoty by mohly mít za následek nedokonalé odrazení elektromagnetického vlnění, popř. by se mohly nečistoty vznítit a způsobit tak požár.
- Před vložením jednotlivých materiálů do vlnovodů se přesvědčte, zda jsou vhodné pro používání v elektromagnetickém poli. Popis základních vhodných či nevhodných materiálů je umístěn níže.
- Před zapnutím mikrovlnných trub je nutné zkontrolovat přiklopení ochranných krytů štěrbin

Při běhu zařízení může dojít, kromě jiného, k těmto případům:

- Při ohřevu za vysokých teplot a při dlouhé době ohřevu dochází k vysušení materiálu a může dojít k jeho přehřátí a vznícení.
- Pokud zpozorujete kouř, vypněte mikrovlnné trouby nebo vytáhněte vidlici síťového přívodu ze zásuvky a počkejte na ochladnutí. V případě plamenů použijte dostupné možnosti hašení.
- Když je zařízení v chodu, mohou být části mikrovlnných trub i vlnovodů horké.
- Pokud trouby nepracují, zkontrolujte elektrickou instalaci, uzavření dveří a správné nastavení programu.
- Po jakékoliv konstrukční úpravě tohoto zařízení se přesvědčte sondou, zda nedochází k nadměrným škodlivým únikům mikrovlnné energie.
- Po ukončení práce na zařízení je nutné, aby byly vidlice síťového přívodu mikrovlnných trub vždy vytaženy ze zásuvky. Mohlo by dojít k náhodnému spuštění neoprávněnou, či neznalou osobou a k jejímu ozáření.

Materiály (ne)vhodné k použití jsou uvedeny v následujícím přehledu:

Vhodné (ideální) materiály, pro rámy podávacího roštu, vodící válce a jiné komponenty zařízení pro mikrovlnný ohřev, jsou materiály nazývané izolanty. Jsou to takové které umožňují průchod mikrovln. Mezi izolanty patří např.:

Tepluvzdorné sklo – pouze bez kovových prvků, nepoškozené (bez prasklin), není doporučeno používat sklo normální;

Plasty – ty které jsou bezpečné pro použití v mikrovlnné troubě. Pozor, některé mohou měknout při kontaktu s teplým materiálem, může dojít i k vznícení;

Dřevo - při vysychání se může rozštípnout nebo prasknout;

Papír – při prudkém ohřátí může dojít k jeho vznícení.

Naopak zcela *nevhodné* je do vlnovodů vkládat materiály jako jsou např.:

Kovy - k mikrovlnnému záření se chovají jako vodiče, způsobují odraz mikrovlnného záření; při jejich interakci s elektromagnetickým zářením v nich dochází k indukci elektrického napětí;

Hliníkové folie – hrozí vznik elektrického oblouku;

5.3 Hygienické normy

Součástí ochrany obsluhy zařízení je znalost účinků působení vysokofrekvenčního pole, které lze obecně rozdělit na netepelné a tepelné.

Při *netepelných* účincích nedochází k absorpci většího výkonu a tedy ani ke zvýšení teploty sledované biologické tkáně. Zatím nebyly prokázány žádné škodlivé účinky na buňky (např. DNA, buněčná membrána).

Při absorpci vyšší úrovně elektromagnetické energie dochází k účinkům *tepelným*, kdy již dojde k ohřevu biologické tkáně [32]. Tepelné účinky jsou sice využívány pro lékařské účely (např. hypertermie a diatermie), při nich jsou ale tepelné dávky přesně řízeny. Při interakci s lidským tělem je však celkový (plošný) ohřev obecně nežádoucí.

Proto bylo nutné zavést hygienické normy, které určují maximální intenzity elektrického pole, kterému smí být člověk vystaven. Zároveň byly zavedeny veličiny popisující účinek elektromagnetického pole na biologickou tkáň. Tyto normy a veličiny se v různých zemích liší. V praxi je nezbytně nutné, aby jakékoliv zařízení využívající elektromagnetického záření splňovalo hygienické předpisy platné v ČR.

5.3.1 Hygienické veličiny

V současné době se nejvíce používá těchto veličin [32]:

- ♦ Hustota dopadajícího výkonu: p [W/m^2]

Tato veličina je dobře měřitelná, ale nedefinuje expozici biologické tkáně elektromagnetickým polem přesně. Do biologické tkáně se dostane jen část dopadajícího výkonu a zbytek je od tkáně odražen. I přes svojí nepřesnost byla tato veličina využívána naší hygienickou normou před vstupem do EU. Nyní je spíše využíváno veličiny SAR.

- ♦ SAR (Specific Absorption Rate) [W/kg]

Tato veličina, zavedena americkým úřadem ANSI (American National Standard Institute), sice naopak velmi přesně definuje míru expozice biologické tkáně elektromagnetickým polem, ale zase se obtížněji měří. Podle uvedeného vztahu je patrné, že jde o výkon absorbovaný na 1 kg tkáně.

$$SAR = \frac{\partial P}{\partial m} = c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (25)$$

kde m je hmotnost tkáně, P je výkon absorbovaný tkání a c tepelná kapacita.

- ♦ ARD (Absorption Rate Density) [W/m^3]

Jde o výkon absorbovaný v jednotce objemu, je tedy velmi blízká veličině SAR.

$$ARD = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [\text{W}/\text{m}^3] \quad (26)$$

- ♦ Intenzita elektrického výkonu: E [V/m]

Z intenzity elektrického výkonu lze určit hustotu dopadajícího výkonu podle vztahu:

$$p = \frac{|E(x, y, z)|^2}{120 \cdot \pi} \quad [\text{W}/\text{m}]. \quad (27)$$

Je dobré si uvědomit, že absorpce a účinky elektromagnetického pole jsou závislé na vlastnostech biologických tkání (geometrickém tvaru, rozměru atp.). Dále pak také na orientaci a polarizaci elektromagnetického pole a jeho kmitočtu, na podmínkách, délce trvání a charakteru ozáření atd.

5.3.2 Hygienické normy v ČR

Hygienické normy jsou důležitou informací pro ochranu lidí před nežádoucími účinky elektromagnetického pole. Proto je třeba věnovat těmto normám značnou pozornost.

V současné době jsou v České Republice platné normy přejaté z EU, které vstoupily v platnost 1.ledna 2001. Jsou stanoveny pro rozmezí frekvencí od 0 Hz do $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz a děleny na čtyři pásma. V naší soustavě je využito frekvence 2,45 GHz, proto je další popis zaměřen na pásmo odpovídající této frekvenci [10], [33].

Hygienická norma se navíc dělí na veřejné prostory (dopad se týká běžných obyvatel) a odborná pracoviště (zaměstnanci). Pro ně jsou povolené hodnoty vyšší, protože jsou pravidelně posíláni na lékařské prohlídky [32].

V tabulce 5.2 jsou uvedeny hodnoty veličiny SAR a nepřekročitelné limity pro okamžité hodnoty veličin E_{max} a p_{max} . Navíc je pro porovnání tabulka rozšířena o hodnoty podle staré normy[32].

Tabulka 5.2: Hygienické normy v ČR

Rozděl. prostor	Nová norma		Stará norma	
	Veřejné prostory	Odborná pracoviště	Veřejné prostory	Odborná pracoviště
SAR [V/m]	0,08	0,4	---	---
E_{max} [V/m]	61,4	137	10	31,6
p_{max} [mW/cm ²]	1	5	0,025	0,265

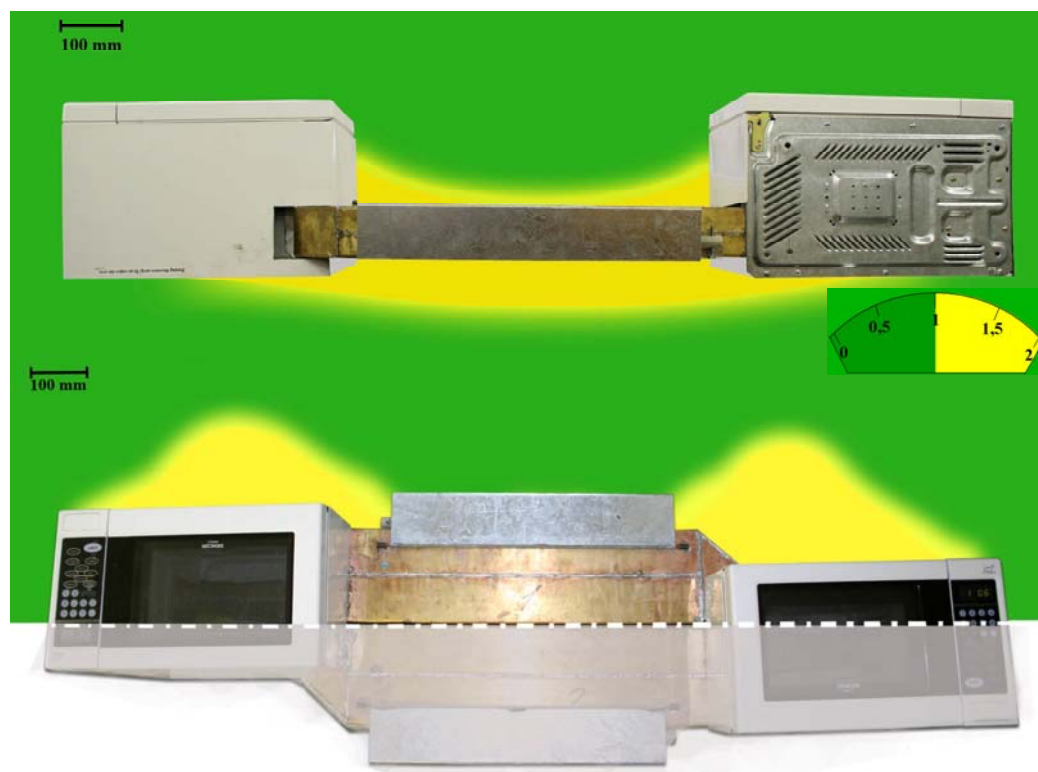
Stará norma byla popsána jen pomocí veličin E_{max} a p_{max} , proto zde není hodnota veličiny SAR uvedena. Z tabulky 5.2 je patrné, že stará norma, stanovená v r.1990, byla mnohem přísnější.

Pozn: Nová norma stanovuje pro interval 10 MHz – 10 THz omezení, že hodnota SAR, přepočtená na celé tělo exponované osoby, nesmí být překročena v žádném šestiminutovém intervalu[10].

6. Experimentální část

6.1 Vyzařování soustavy

I když bylo zařízení konstruováno s požadavkem minimálních úniků mikrovlnného záření, přece jen k nim dochází. Proto bylo provedeno měření těchto úniků pomocí sondy a nebezpečná místa byla zakreslena do obrázku 6.1.

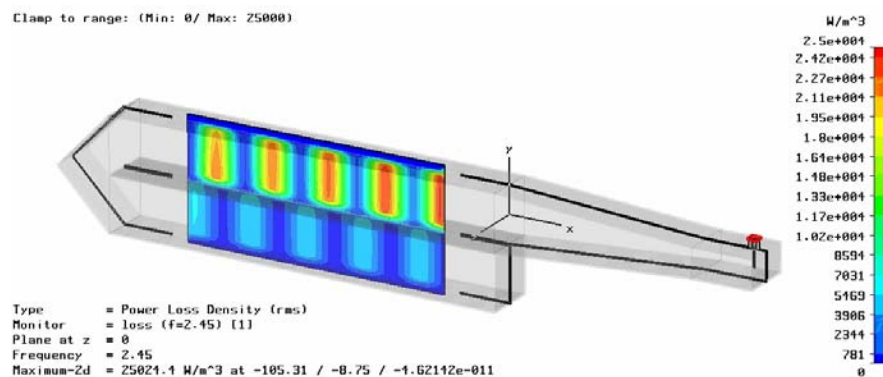


Obr. 6.1: Vyzařování soustavy štěrbinami

Žlutá pole jsou nebezpečná, jejich rozsah je od 1 mW/cm^2 výše. Je doporučeno se při běhu zařízení v těchto zónách nezdržovat. Zelená oblast je bezpečná dle platných norem, a rozsah je $0 - 1 \text{ mW/cm}^2$ vyzářené energie.

6.2 Mapování tepelných polí

Při prvním spuštění bylo cílem zjistit, zda zařízení funguje podle předpokládaného průběhu intenzit elektromagnetického pole. Simulace tohoto průběhu byla navržena programem CST Microwave Studio a je patrná na obrázku 6.2.



Obr 6.2: Průběh intenzity elektromagnetického pole v rovině xy [5]

K mapování tepelných polí ve vlnovodu byla použita infračervená kamera. Pokus byl prováděn na dvou materiálech. Prvním z nich byla silná netkaná textilie a druhým tenká bavlněná tkanina.

Materiál byl navlhčen vodou a položen na desku z plexiskla. Poté byla deska vložena do štěrbin vlnovodů. Testy byly prováděny při výkonu mikrovlnné trouby 10%, 50% a 100% celkového výkonu.

Parametry testu:

Používané výkony: P1 = 10% celkového výkonu, P5 = 50% celkového výkonu,
P10 = 100% celkového výkonu;

Klimatické podmínky: Teplota okolí: 20,3 °C

Vlhkost: 40 %

Materiál: NT – netkaná textilie – Materiál: 100% PES

$$\rho_s = 316 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$$

T – tkanina – Materiál: 100% Ba

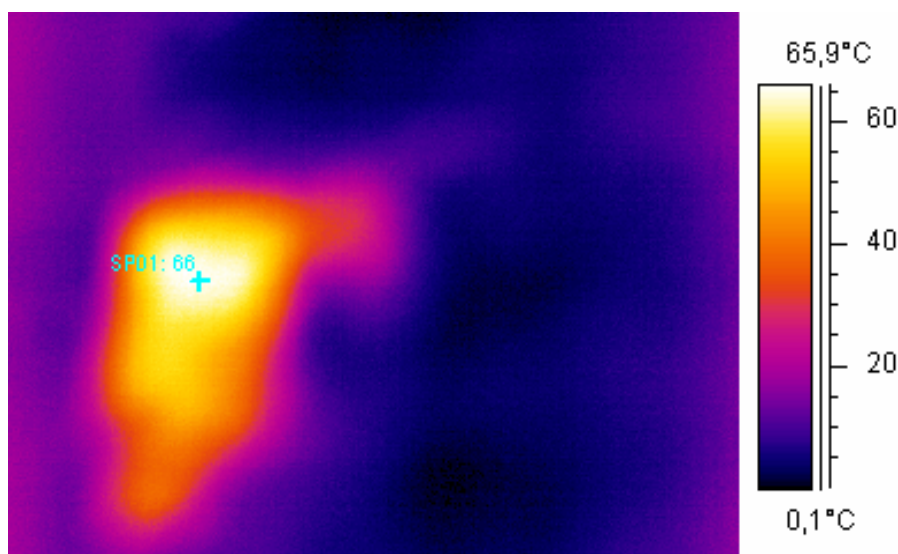
$$\rho_s = 139 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$$

Nejprve bylo měřeno na 1. části zařízení, na obrázku 4.5 vpravo. Během měření ale mikrovlnná trouba této části začala vykazovat poruchu a proto zbytek měření proběhl na části druhé (viz. obr. 4.5, část vlevo). V druhé části zařízení však při spuštění docházelo k jiskření, které bylo způsobeno nedokonalým svárem, ale i přes tento nedostatek bylo měření dokončeno.

Následně byl celý systém odeslán ke kompletnímu zapájení šterbin a odstranění závady na první části zařízení. Měření pak bylo provedeno znovu. Snímky pořízené po úpravě zařízení jsou umístěny níže. Pro porovnání hodnot teplot a rozložení pole před a po úpravě zařízení zde byly umístěny i dva snímky pořízené před úpravou (obr. 6.4 a 6.8). Ostatní snímky, pořízené před úpravou zařízení, jsou umístěny v příloze B.

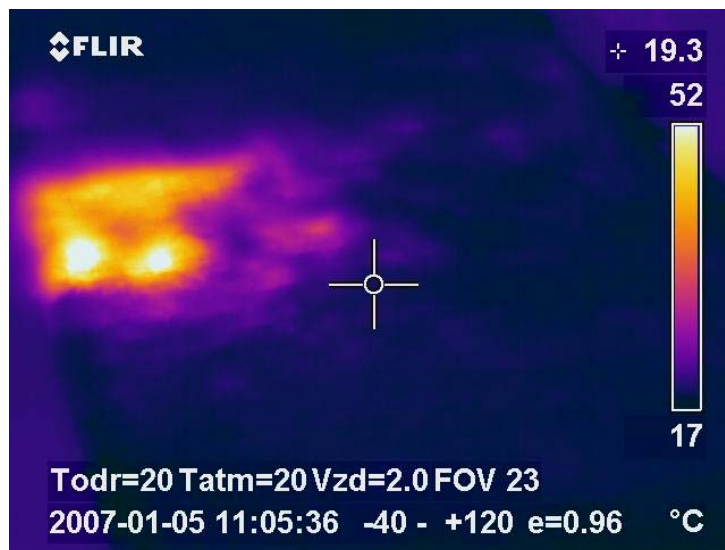
Měření materiálu NT:

První měření bylo provedeno na 2.části zařízení při výkonu 50% a materiál byl ponechán ve vlnovodech po dobu $t = 30\text{s}$. Na obr. 6.3 a 6.4 jsou zobrazena mapování polí ve 2.části zařízení po a před úpravou zařízení.



Obr. 6.3: NT po ohřevu v 2. části zařízení po úpravě, při výkonu P5, $t = 30\text{s}$

Po úpravě zařízení bylo po ohřevu při ústí aplikátoru patrné ohřátí na teplotu 66°C. Silný materiál s velkým obsahem vody pohlcuje většinu mikrovln už při samotném ústí aplikátoru. Proto se maxima dále nevyskytovala.

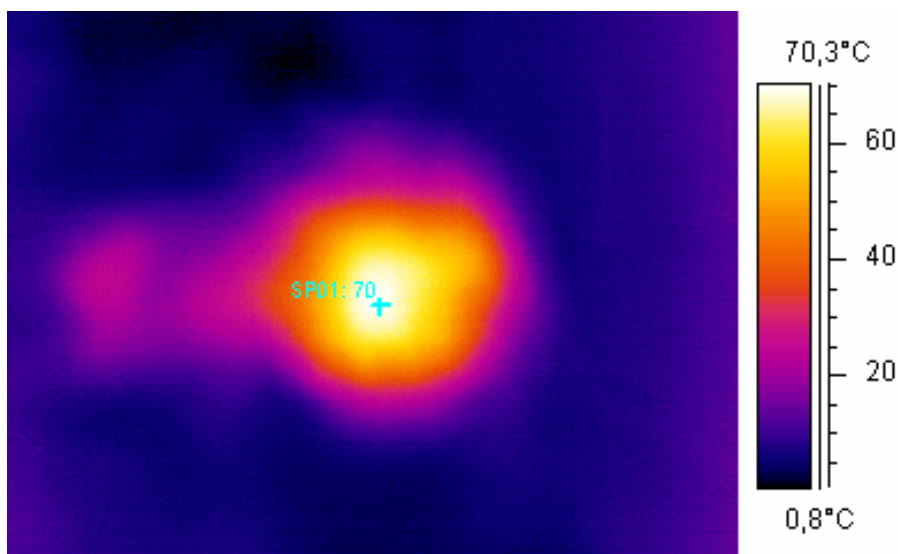


Obr. 6.4: NT po ohřevu v 2. části zařízení před jeho úpravou, při výkonu P5, $t = 30s$

Ze snímku pořízeným před zapájením šterbin bylo patrné ohřátí také pouze při ústí aplikátoru. Materiál se ohřál na teplotu 52°C , dále se maxima nevyskytovala.

Snímky 6.3 a 6.4 nám umožňují posoudit, jak výrazný vliv mají nedokonalosti vlnovodů. Jejich porovnáním bylo zjištěno, že maximální teplota byla po úpravě zařízení, při dodržení stejných parametrů testu, o 14°C vyšší.

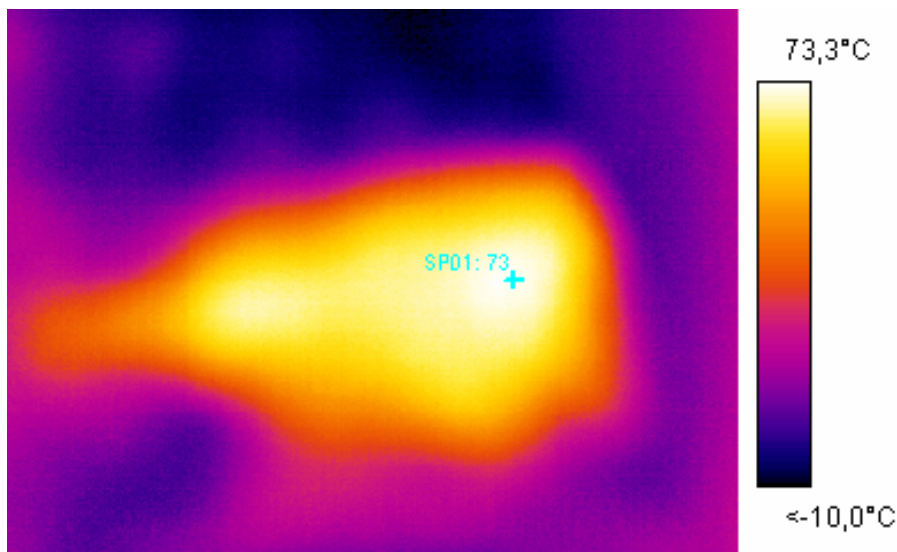
Měření druhé bylo provedeno na 1.části zařízení, opět při výkonu 50% celkového výkonu po dobu $t = 30s$ a je zobrazeno na obrázku 6.5. Tento snímek je možné porovnat se snímek pořízeným před úpravou zařízení (obrázek B.2), který je umístěn v příloze B.



Obr. 6.5: NT po ohřevu v 1. části zařízení po úpravě, při výkonu P5, $t = 30s$

Po ohřevu bylo při ústí aplikátoru patrné ohřátí na teplotu 70°C. Tak jako u předešlých měření byla většina energie pohlcena při ústí aplikátoru a dále se maxima nevyskytovala.

Třetí měření bylo provedeno na 1.části zařízení, ale bylo použito výkonu 100% po dobu $t = 30\text{s}$. Snímek, pořízen infračervenou kamerou, je zobrazen na obrázku 6.6.

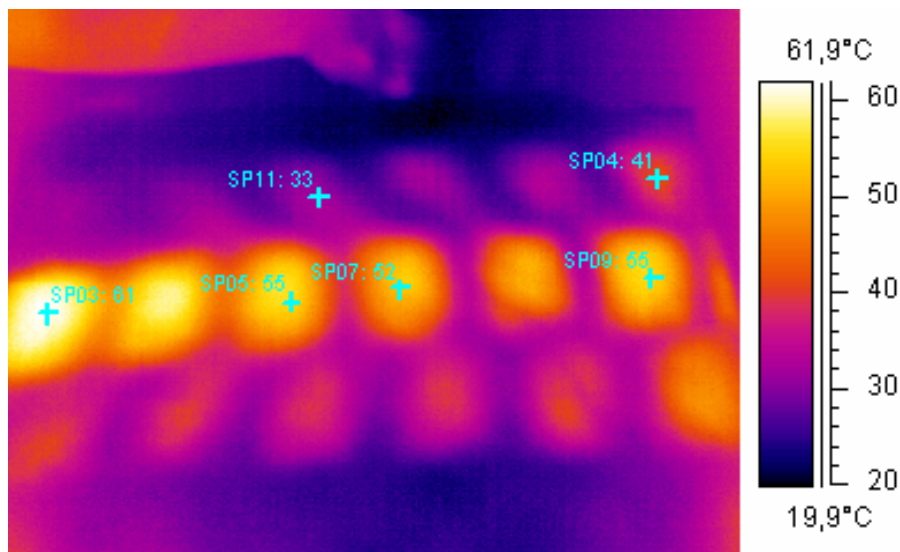


Obr. 6.6: NT po ohřevu v 1.části zařízení po úpravě, při výkonu P10, $t = 30\text{s}$

Po ohřevu bylo při ústí aplikátoru patrné ohřátí na teplotu 73°C. Taktéž byla většina energie pohlcena při ústí aplikátoru, ale bylo patrné i druhé maximum. Dále se maxima nevyskytovala.

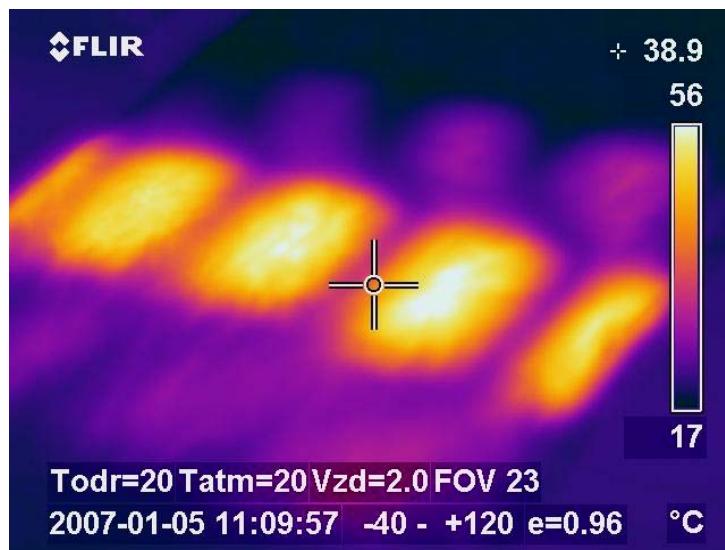
Měření materiálu T:

První měření tkaniny probíhalo ve 2.části zařízení při výkonu P5. Materiál byl ponechán ve vlnovodech po časový úsek $t = 60s$. Tepelný stav po ohřevu je patrný z obrázku 6.7.



Obr. 6.7: T po ohřevu v 2. části zařízení po úpravě, při výkonu P5, $t = 30s$

Po ohřevu jsou patrná maxima v celé šíři textilie ve třech řadách. První řada vyskytujících se maxim není způsobena absorpcí mikrovlnné energie, ale vlivem odchodu par z vlnovodu. V řadě druhé bylo při ústí aplikátoru (v místě prvního maxima) patrné ohřátí na teplotu 61°C. Dále se teplota v jednotlivých maximech postupně snižuje vlivem spotřebování energie vlny. Vyskytující se fialová maxima ve řadě třetí (druhá část vlnovodu za ohybem) jsou způsobena absorpcí energie nespotřebované v první části zařízení.

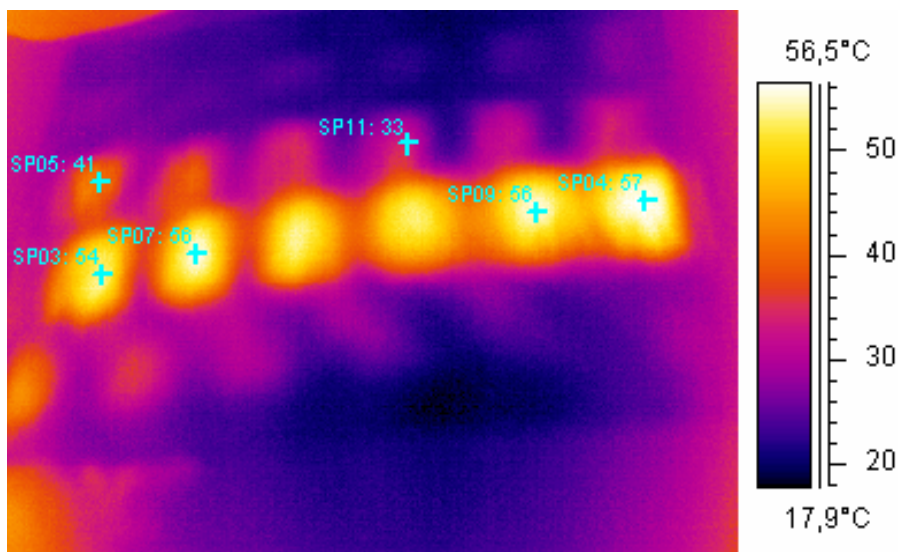


Obr. 6.8: T po ohřevu ve 2. části zařízení před úpravou zařízení, při P5, $t = 60s$

Na obrázku 6.8 je snímek tepelného pole tkaniny, naměřeného před úpravou zařízení. Po ohřevu jsou patrná maxima po celé délce textilie, k ohřátí došlo na teplotu 56°C.

Porovnáním snímků 6.7 a 6.8 bylo zjištěno, že maximální teplota naměřená při ústí aplikátory byla po úpravě zařízení o 5°C vyšší. Tento rozdíl je menší než u netkané textilie vlivem tloušťky materiálu.

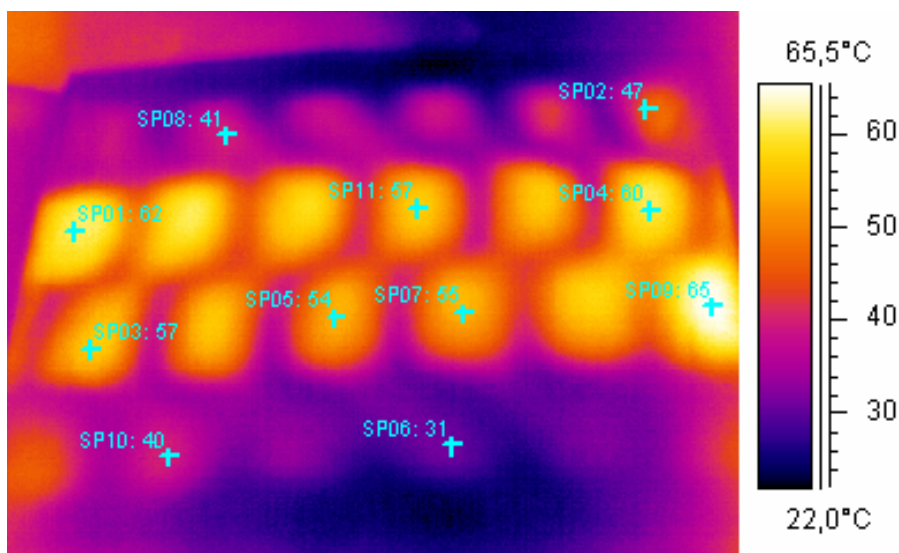
Měření druhé bylo provedeno na první části zařízení, opět při výkonu 50% celkového výkonu a po dobu $t = 60s$. Pořízený snímek je na obrázku 6.9.



Obr. 6.9: T po ohřevu v 1. části zařízení po úpravě, při výkonu P5, $t = 60s$

Po ohřevu jsou patrná maxima v celé šíři textilie ve třech řadách. Vyskytující se maxima ve řadě první (druhá část vlnovodu za ohybem) jsou způsobena absorpcí energie nespotřebované v první části zařízení. V řadě druhé bylo při ústí aplikátoru (v místě prvního maxima) patrné ohřátí na teplotu 54°C. Dále se teplota v jednotlivých maximech postupně snižuje vlivem spotřebování energie vlny. Třetí řada vyskytujících se maxim není způsobena absorpcí mikrovlnné energie, ale vlivem odchodu par z vlnovodu.

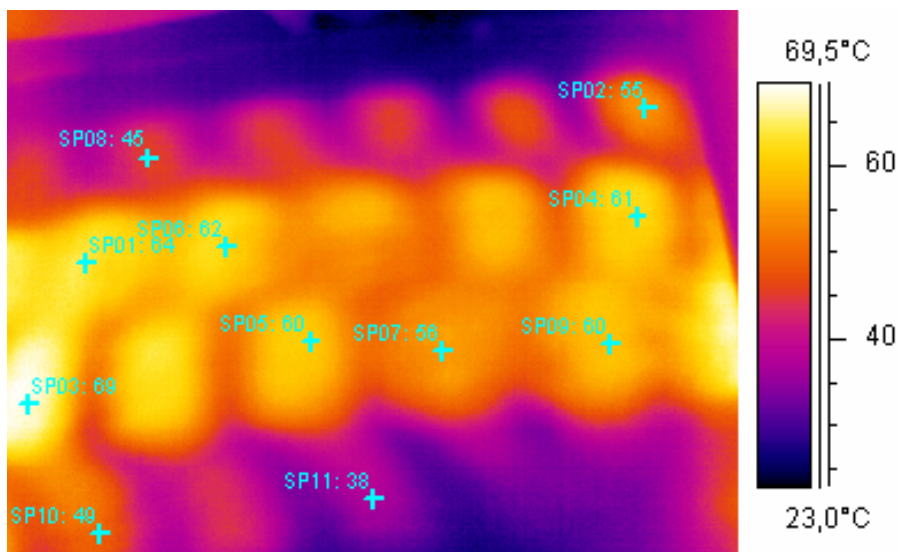
Třetí měření bylo provedeno na obou částech zařízení při výkonu 50% po dobu $t = 60\text{s}$. Snímek, pořízen infračervenou kamerou, je zobrazen na obr. 6.10.



Obr. 6.10: T po ohřevu v obou částech zařízení po úpravě, při výkonu P5, $t = 60\text{s}$

Po ohřevu jsou patrná maxima v celé šíři textilie ve čtyřech řadách. První dvě řady maxim jsou způsobeny absorpcí energie z 1.části zařízení, třetí a čtvrtá řada z části druhé. V 1.části zařízení (pravé) vykazovalo první maximum teplotu 65°C, v 2.části (levé) 62°C.

Čtvrté měření bylo taktéž provedeno na obou částech zařízení, ale bylo použito výkonu 100%. Doba expozice zůstala stejná, tedy $t = 60\text{s}$. Pořízený snímek je na obr. 6.11.



Obr. 6.11: NT po ohřevu v obou částech zařízení po úpravě, při výkonu P10, $t = 30\text{s}$

Stejně jako u snímku 6.10 jsou patrné čtyři řady maxim. Rozdíl je pouze v tom, že zvýšením výkonu bylo dosaženo ohřevu větší plochy materiálu, ale teplota maxim se zvýšila jen minimálně. V pravé části zařízení bylo první maximum ohřáté na teplotu 69°C , v levé části na teplotu 64°C .

Z měření na tenké textilií je patrné, že rozložení pole přibližně odpovídá návrhu z programu CST Microwave studio.

Pozorováním tepelných polí bylo zjištěny maximální možné teploty, které byly docíleny při výkonu P10. U netkané textilie (NT) jsme dosáhli po 30s expozice cca 73°C . U tkaniny (T) bylo i přes delší dobu expozice, $t = 60\text{s}$, dosaženo pouhých 69°C . Je evidentní, že množství absorbované energie je závislé na tloušťce textilie. Netkaná textilie o tloušťce cca 1cm pojala více vody, absorbovala tedy více energie a více se i ohřála.

Použití plexiskla, jako podkladové desky při mapování polí pomocí infračervené kamery, se ukázalo jako výhoda. Textilie si po ohřátí déle držela konstantní teplotu. Bylo tak snadnější tyto pole zachytit. Pro použití v praxi by však bylo pokládání na takovouto homogenní desku nevýhodné. Voda která se z materiálu odpaří, se mezi textilií a deskou opět vysráží a nedojde tak k jejímu odstranění.

6.3 Sušící křivky

Sušící křivky jsou důležité pro hodnocení kinetiky sušení. Pro hodnocení bylo použito dvou metod. První je založena na vážení vzorků, druhá na hodnocení fotografií sušeného materiálu obrazovou analýzou.

Materiál, byl rozdělen na čtyři části o velikosti 80 x 410mm. Ty svou velikostí odpovídají vnitřnímu prostoru jednotlivých částí vlnovodů. Každý pruh byl namočen, s využitím laboratorního fuláru vyždímán na hmotnost odpovídající 100%-ní vlhkosti a položen na rošt. Na obrázku 6.12 je znázorněno vkládání do vlnovodu. Byla sledována změna hmotnosti v každé části zařízení zvlášť.



Obr. 6.12: Schéma rozložení materiálu ve vlnovodech

Mezi každým měřením (během doby vážení) byly ponechány otevřené oba kryty šterbin, aby pára, odpařená z materiálu, mohla odcházet z prostoru vlnovodů.

6.3.1 Hodnocení vysušení vážením

Měření bylo provedeno pro dva materiály, tkaniny s rozdílnou plošnou hmotností:

T_N – tkanina s nízkou plošnou hmotností –	Materiál: 100% Ba
	$\rho_s = 142 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
	$\rho_v = 449,8 \text{ kg/m}^3$
T_V – tkanina s vysokou plošnou hmotností –	Materiál: 100% Ba
	$\rho_s = 217 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
	$\rho_v = 429,5 \text{ kg/m}^3$

Ke každému měření byly zpracovány podrobné tabulky naměřených hodnot dosažených po konkrétní době působení mikrovln. Ty jsou uvedeny v příloze C.

6.3.1.1 Sušící křivky tkaniny T_N

Při tomto měření byly použity dvě metody:

- ♦ *Metoda A* – Materiál, namočen na 100%-ní vlhkost, byl položen na rošt, podroben působení mikrovln po dobu $t_0 = 10\text{ s}$ a zvážen. Poté byl znova namočen na 100%-ní vlhkost a sušen po dobu $t_0 = t_0 + \Delta t$ [s], kde $\Delta t = 10\text{ s}$. Tento cyklus byl opakován až do doby $t = 110\text{ s}$ (pokud není uvedeno jinak).
- ♦ *Metoda B* – Materiál byl namočen na 100%-ní vlhkost a po intervalech sušení $\Delta t = 10\text{ s}$ vážen. Měření probíhalo do $t = 110\text{ s}$. Během měření byl kladen důraz na to, aby byl materiál po každém zvážení položen do stejné polohy a na stejnou část roštu.

Parametry testu:

Použité výkony: P10, P5, P3;

$m_0 = 4,4\text{ g}$, pokud není uvedeno jinak;

$m_v = 4,4\text{ g}$, pokud není uvedeno jinak;

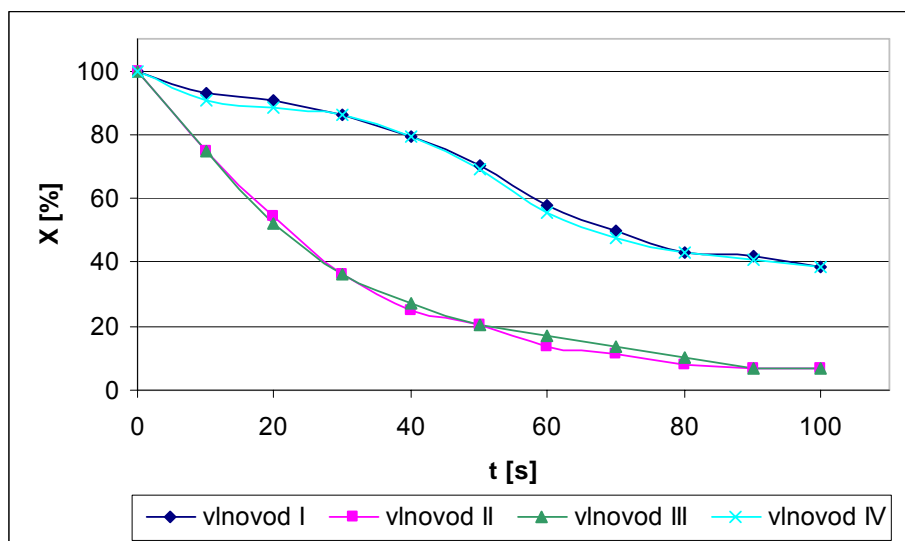
$m_{100} = 8,8\text{ g}$, pokud není uvedeno jinak;

V tabulkách 6.1 až 6.6 jsou uvedeny hodnoty vlhkosti X [%], naměřené v době ukončení experimentu, tj. po celkové době, po kterou byl materiál vystaven působení mikrovln. Tyto hodnoty byly vypočteny podle vztahu (24). Na obrázcích 6.13 až 6.18 jsou znázorněny grafy sušících křivek materiálu o nízké plošné hustotě.

Měření při výkonu P10:*Metoda A:*

Tabulka 6.1: Hodnoty X [%] naměřené metodou A při výkon P10 na materiálu T_N
po čase $t = 100s$

Vlnovod	I	II	III	IV
X [%]	38,64	6,82	11,36	38,64



Obr. 6.13: Sušící křivka dosažená metodou A, při výkonu P10 na materiálu T_N

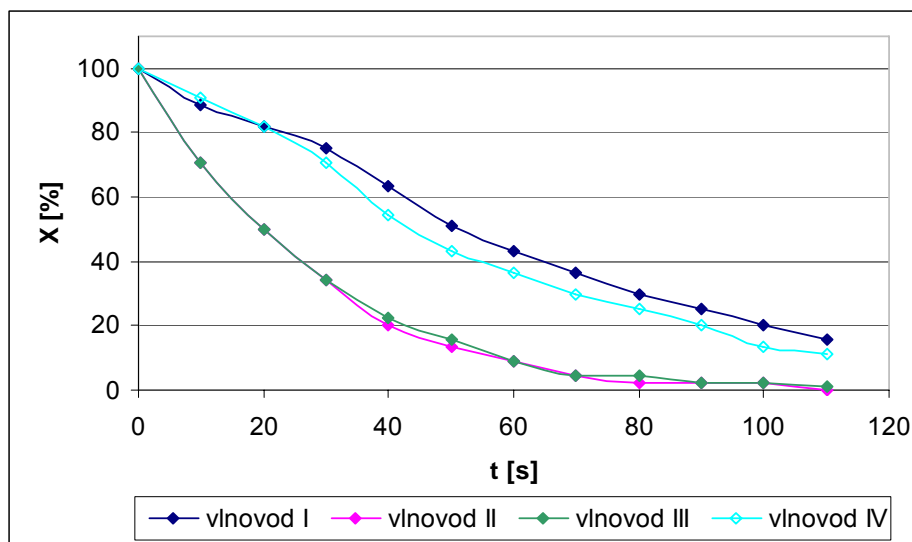
V čase $t = 80s$ bylo patrné v místech maxim vlnovodů II a III přesušení. Textilie, původně modré barvy, se zbarvila mírně do fialova.

Ke konci měření byla patrná kondenzace par ve vlnovodech a hrozilo znehodnocení vzorků. Proto byl experiment ukončen již po čase $t = 100s$.

Metoda B:

Tabulka 6.2: Hodnoty X [%] naměřené metodou B, při výkon P10 na materiálu T_N
po čase $t = 110s$

Vlnovod	I	II	III	IV
X [%]	15,91	0,00	1,14	11,36



Obr. 6.14: Sušící křivka dosažená metodou B, při výkonu P10 na materiálu T_N

Ve vlnovodu II byl materiál vysušen úplně a proto se stejně jako v předešlém případě projevilo přesušení, tentokrát už v čase $t = 70s$.

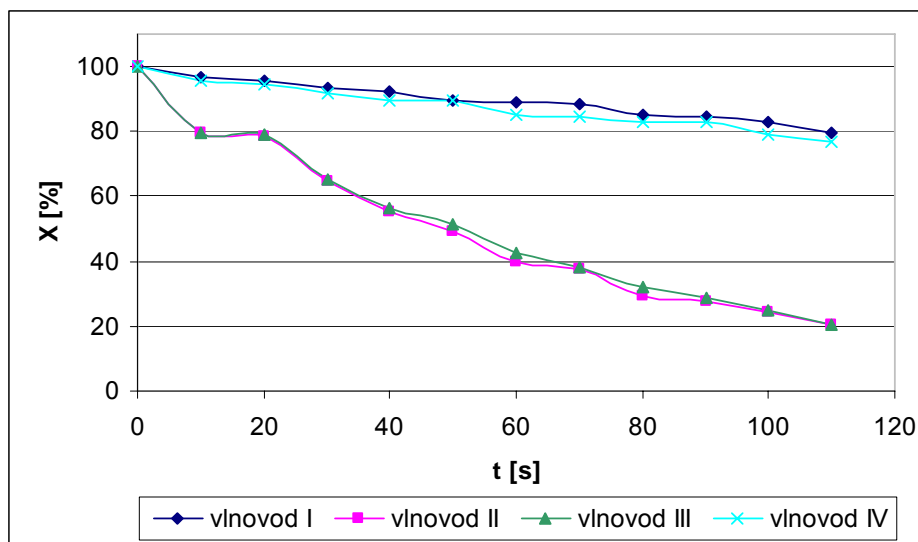
Při výkonu P10 byla u obou metod znatelná maxima ve vlnovodech II a III v čase $t = 30s$, ve vlnovodech I a IV v $t = 50s$.

Měření při výkonu P5:

Metoda A:

Tabulka 6.3: Hodnoty X [%] naměřené metodou A, při výkon P5 na materiálu T_N
po čase $t = 110s$

Vlnovod	I	II	III	IV
X [%]	79,77	20,68	20,23	76,59

Obr. 6.15: Sušící křivka dosažená metodou A, při výkonu P5 na materiálu T_N

Metoda B:

Počáteční podmínky testu:

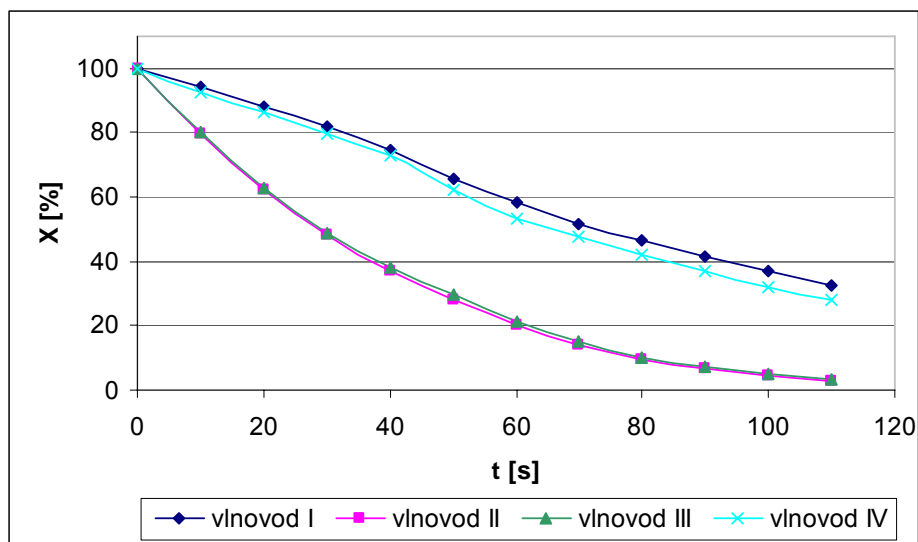
$$m_0 = 4,2 \text{ g}$$

$$m_v = 4,2 \text{ g}$$

$$m_{100} = 8,4 \text{ g}$$

Tabulka 6.4: Hodnoty X [%] naměřené metodou B, při výkon P5 na materiálu T_N
po čase $t = 110\text{s}$

Vlnovod	I	II	III	IV
X [%]	32,62	2,86	3,57	27,86



Obr. 6.16: Sušící křivka dosažená metodou B, při výkonu P5 na materiálu T_N

Při výkonu P5 byla první maxima patrná u vlnovodů II a III v čase $t = 40s$. U vlnovodů III a IV byla znatelná v čase $t = 80s$.

Měření při výkonu P3:

Metoda A:

Počáteční podmínky testu:

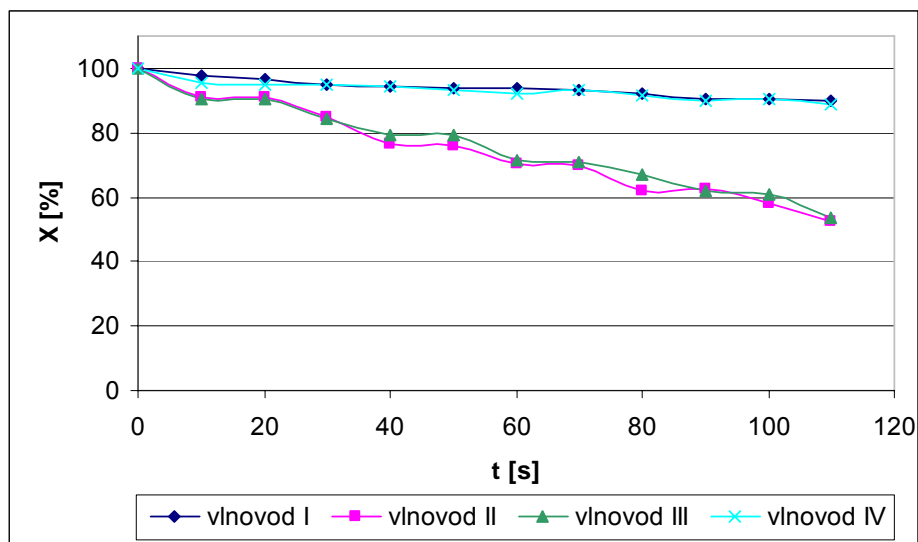
$$m_0 = 4,2 \text{ g}$$

$$m_v = 4,2 \text{ g}$$

$$m_{100} = 8,4 \text{ g}$$

Tabulka 6.5: Hodnoty $X[\%]$, naměřené metodou A, při výkon P3 na materiálu T_N
po čase $t = 110s$

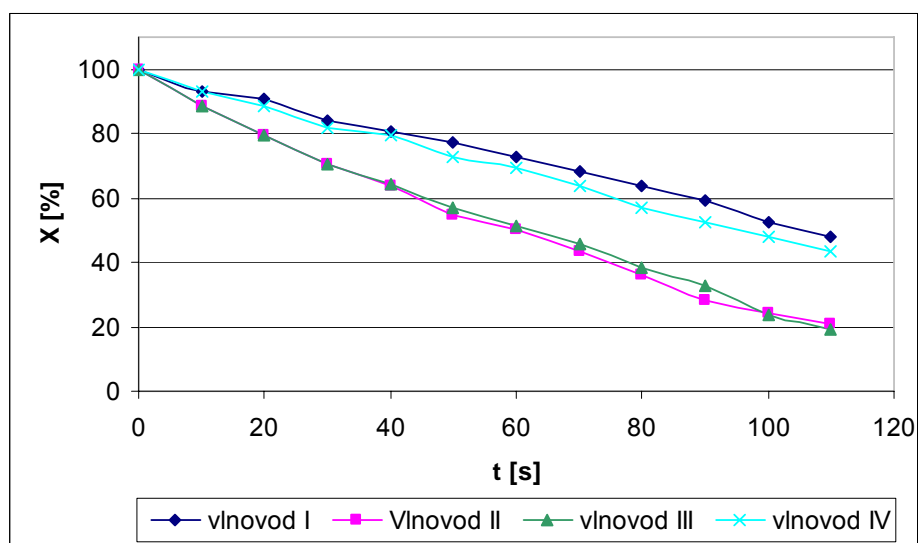
Vlnovod	I	II	III	IV
X [%]	89,61	52,62	53,81	88,81

Obr. 6.17: Sušící křivka dosažená metodou A, při výkonu P3 na materiálu T_N

Metoda B:

Tabulka 6.6: Hodnoty X [%], naměřené metodou B, při výkon P3 na materiálu T_N
po čase $t = 110s$

Vlnovod	I	II	III	IV
X [%]	47,73	20,68	19,09	43,18

Obr. 6.18: Sušící křivka dosažená metodou B, při výkonu P3 na materiálu T_N

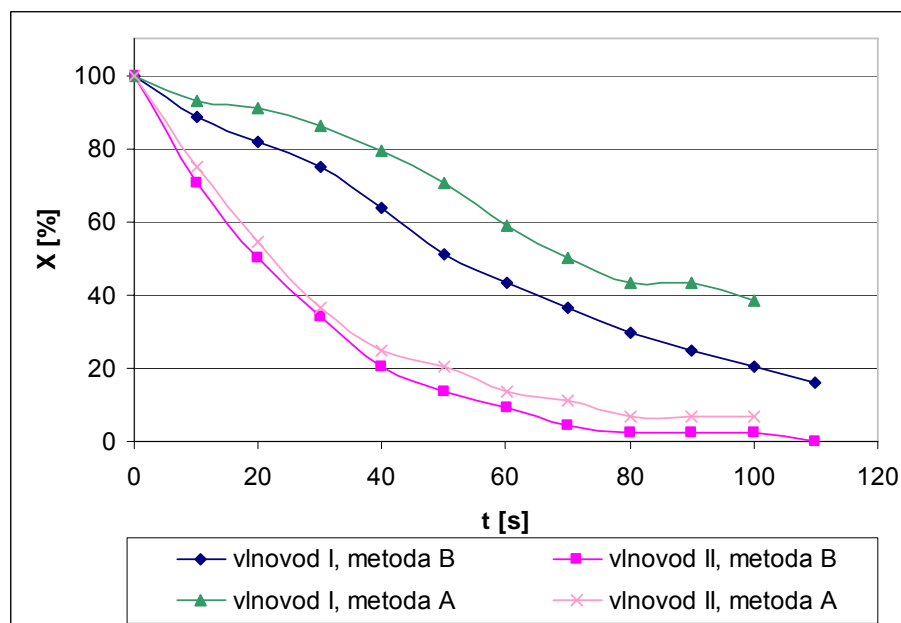
Při měření s výkonem P3 byla první maxima patrná u vlnovodů II a III v čase $t = 100\text{s}$, u vlnovodů III a IV se maxima vůbec neprojevila.

Jasný rozdíl mezi hodnotami z vlnovodů I, IV a II, III je způsoben tím, že elektromagnetická vlna prochází z vlnovodu II do I a z III do IV (viz. obr. 6.12). Z počátku se většina její energie spotřebovává právě v části II a III, dokud není větší část materiálu suchá. Do vlnovodů I a IV prochází už jen tolik energie, kolik se nespotřebuje v II a III. Maxima se tedy v částech I a IV projeví až později.

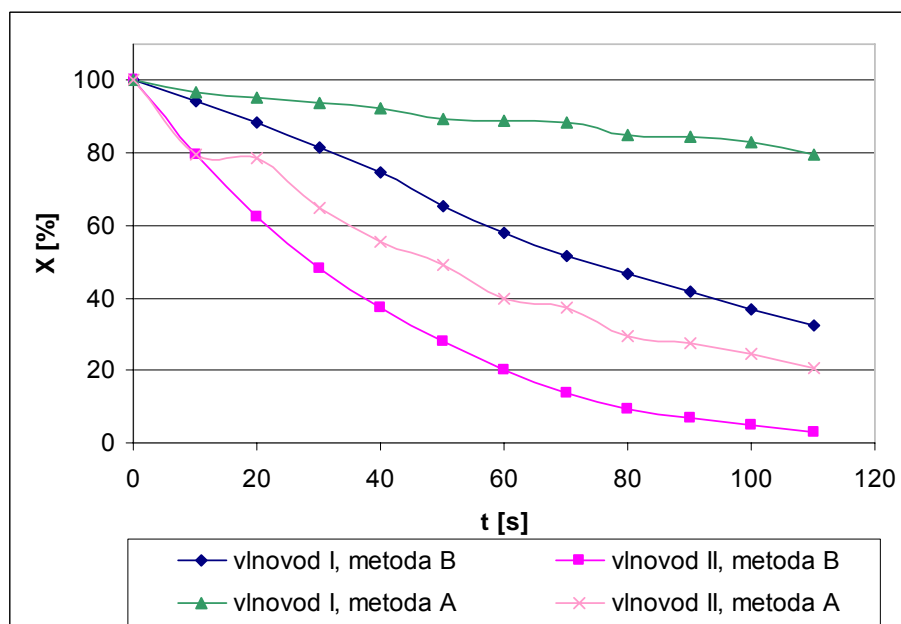
Zvláštním jevem je, že při všech měřeních bylo dosaženo u dvojice vlnovodů II a IV lepšího vysušení, i přes to, že tyto vlnovody na sebe nenavazují (viz. obr. 6.12). Z hodnot vyplývá, že ve vlnovodu II se spotřebovalo více energie než ve vlnovodu III a proto méně prošlo do I a naopak více energie přešlo z vlnovodu III do vlnovodu IV. Tato zvláštnost je s největší pravděpodobností způsobena nedokonalostmi vlnovodů. Vlnovody měly být vyrobeny jako dokonalé kopie, což patrně nebylo dodrženo.

Porovnání metod:

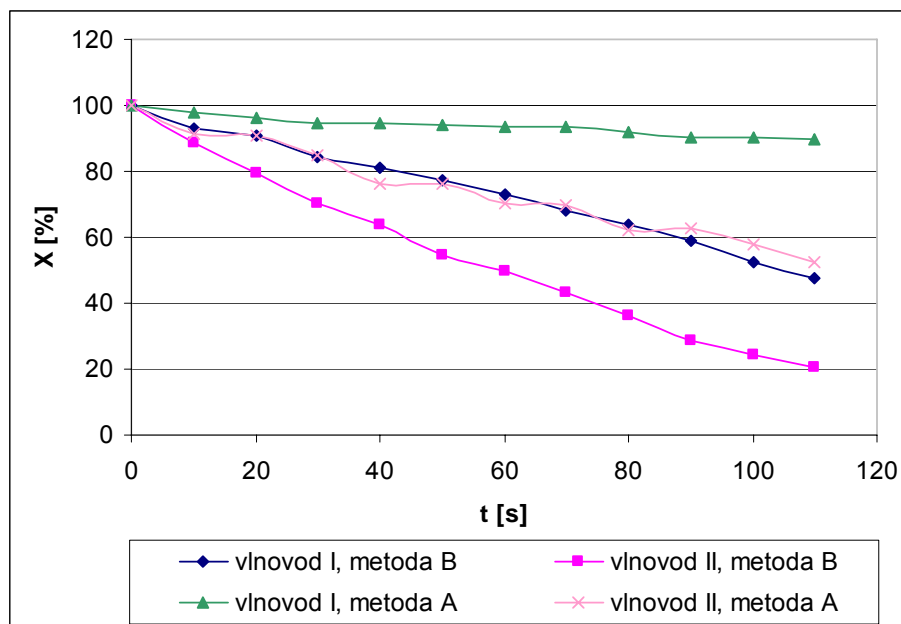
Porovnání metod A a B pro výkony P10 a P5 a P3 je znázorněno na obrázcích 6.19 až 6.21. Pro porovnání byly použity charakteristiky z vlnovodů I a II (ve vlnovodech III a IV bylo dosaženo podobných hodnot).



Obr. 6.19: Porovnání metod měření pro výkon P10 a použití materiálu T_N



Obr. 6.20: Porovnání metod měření pro výkon P5 a použití materiálu T_N

Obr. 6.21: Porovnání metod měření pro výkon P3 a použití materiálu T_N

Při *metodě B* bylo u všech výkonů a ve všech vlnovodech dosaženo lepšího vysušení než u metody A. V tabulce jsou uvedeny hodnoty rozdílu vlhkosti pro vlnovody I a II (ve vlnovodech III a IV byly dosaženy podobné hodnoty).

Tab. 6.7: Porovnání vlhkostí pro vlnovody I a II podle výkonu magnetronu
v čase $t = 100s$

Vlnovod	ΔX [%]	
	I	II
P10	18,19	4,55
P5	46,05	19,56
P3	37,97	33,78

Hodnoty ΔX [%] byly vypočteny podle vztahu:

$$\Delta X = X_B - X_A [\%], \quad (28)$$

kde X_A jsou hodnoty vlhkosti získané metodou A a X_B hodnoty vlhkosti dosažené metodou B.

Rozdíl je způsoben samotným principem *metody B*, kdy byl materiál namočen jen jednou a během sušení byl po každých 10-ti vteřinách vyjmut ze zařízení a vážen. Páry, obsažené na povrchu a uvnitř materiálu, měly při manipulaci během vážení větší čas pro odchod. Výsledné hodnoty jsou tímto výrazně ovlivněny.

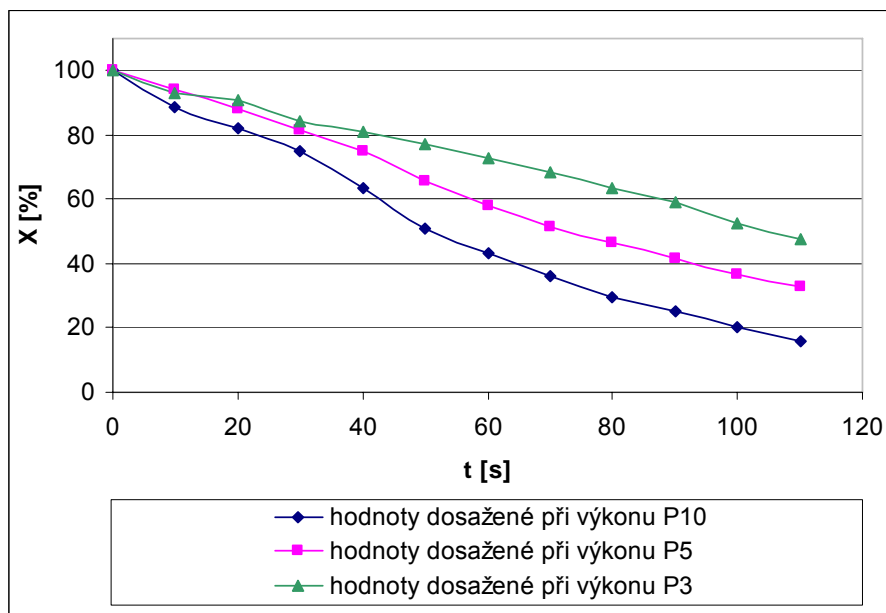
Naopak u *metody A* byl materiál ponechán po celou dobu expozice ve vlnovodech. Páry se ve vlnovodech držely a zpětně ovlivňovaly (snižovaly rychlost) sušení materiálu.

Toto zařízení nebylo opatřeno odvodem par a hodnoty jsou tímto ovlivněny. V klasických sušárnách odvod par výrazně urychluje proces sušení. Proto i v zařízení, používaném v této práci, bude jeho přítomnost pro další použití nepostradatelná. Lze tedy předpokládat, že hodnoty naměřené při *metodě B* se spíše blíží hodnotám, které by vykazovalo zařízení po opatření odvodem par. Z tohoto důvodu bylo dále použito pouze této metody.

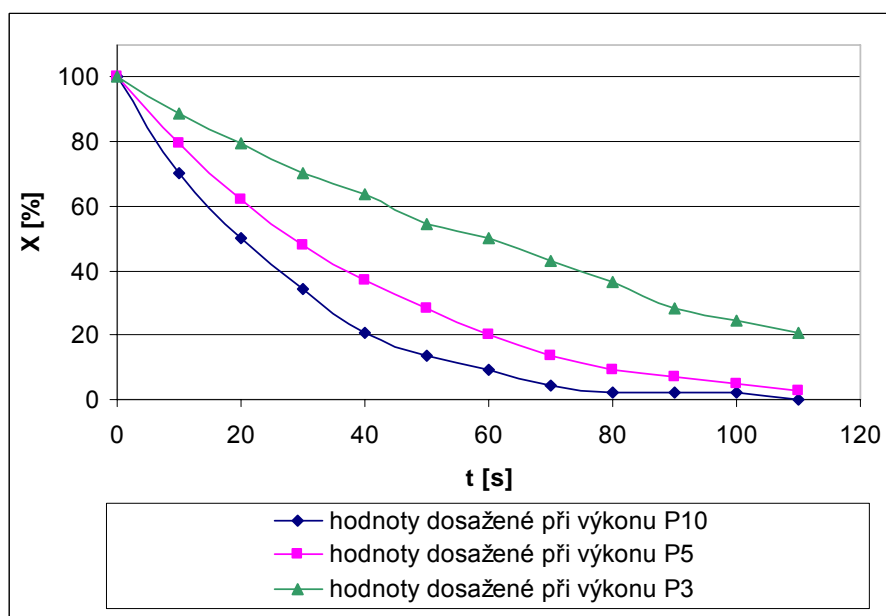
U metody A i B je patrný „skokový průběh“ při použitých výkonech P5 a P3. Ten je způsoben pulzním režimem magnetronu, kterým je řízen jeho výkon. U P3 běží magnetron z 10-ti vteřin expozice jen 4,5s, u P5 běží 8,5s. Při výkonu P10 je magnetron v činnosti po celou dobu expozice, proto se skokový průběh neprojeví.

Porovnání výkonů:

Na obrázcích 6.22 a 6.23 jsou znázorněny grafy závislosti vlhkosti na čase podle výkonů P10, P5 a P3. Porovnání výkonů bylo provedeno pro hodnoty z vlnovodů I a II naměřené metodou B (ve vlnovodech III a IV byly dosaženy podobné hodnoty).



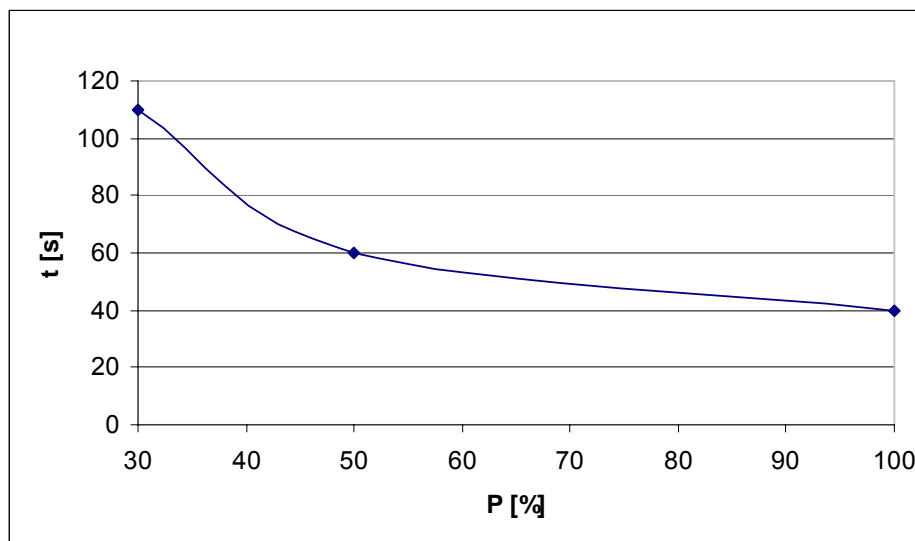
Obr. 6.22: Porovnání výkonů podle dosažených vlhkostí materiálu T_N metodou B ve vlnovodu I



Obr. 6.23: Porovnání výkonů podle dosažených vlhkostí materiálu T_N metodou B ve vlnovodu II

Podle očekávání bylo dosaženo nejlepších hodnot při výkonu 100%, poté při 50%-ním výkonu a nejhorší byly dosaženy při výkonu 30%. Ty byly, v porovnání s výkony P10 a P5, zcela nepostačující. Proto tyto hodnoty byly brány pouze jako orientační a další experimenty při výkonu P3 už prováděny nebyly.

Z obrázku 6.24 je jasná závislost doby sušení na použitém výkonu $t = f(P)$. Bylo zde použito hodnot dosažených při metodě B při výkonech 100%, 50% a 30%. Hodnoty v grafu odpovídají průměrné hodnotě \bar{X} , která byla vypočtena z hodnot pro vlnovody II a III. Aby bylo možné relevantní porovnání, byly vybrány takové časy, při kterých dosáhl materiál vlhkosti $21 \pm 1\%$. Při výkonu P10 obsahoval materiál po čase $t = 40\text{s}$ cca 22% vlhkosti, při výkonu P5 obsahoval 21% v čase $t = 60\text{s}$ a při P3 bylo dosaženo 20% vlhkosti až po $t = 110\text{s}$.



Obr. 6.24: Závislost doby sušení na výkonu, pro metodu B

6.3.1.2 Sušící křivky tkaniny T_V

Měření probíhalo pouze *metodou B*. Postup byl stejný jako u materiálu T_N , ale vzhledem k tomu, že proces probíhal pomaleji, bylo zapotřebí delšího času expozice. Měření probíhalo až do $t = 160$ s.

Parametry testu:

Použité výkony: P10, P5;

$m_0 = 7,1$ g;

$m_v = 7,1$ g;

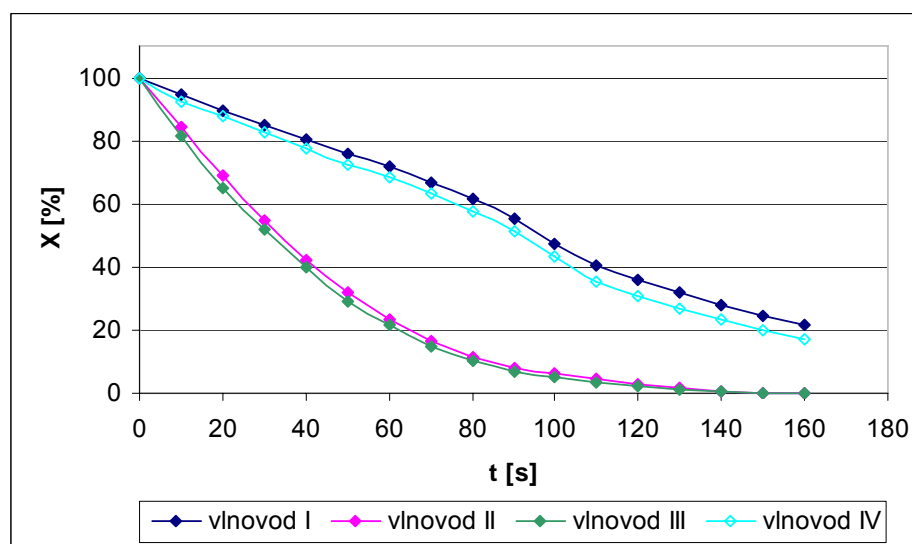
$m_{100} = 14,2$ g;

V tabulkách 6.8 a 6.9 jsou uvedeny hodnoty vlhkosti X [%], naměřené v době $t = 160$ s metodou B. Tyto hodnoty byly vypočteny podle vztahu (24). Na obr. 6.25 a 6.26 jsou znázorněny grafy sušících křivek materiálu o vysoké plošné hustotě.

Měření při výkonu P10:

Tabulka 6.8: Hodnoty X [%] naměřené metodou B při výkonu P10 na materiálu T_V
po čase $t = 160$ s

Vlnovod	I	II	III	IV
X [%]	21,83	0,00	0,00	17,32



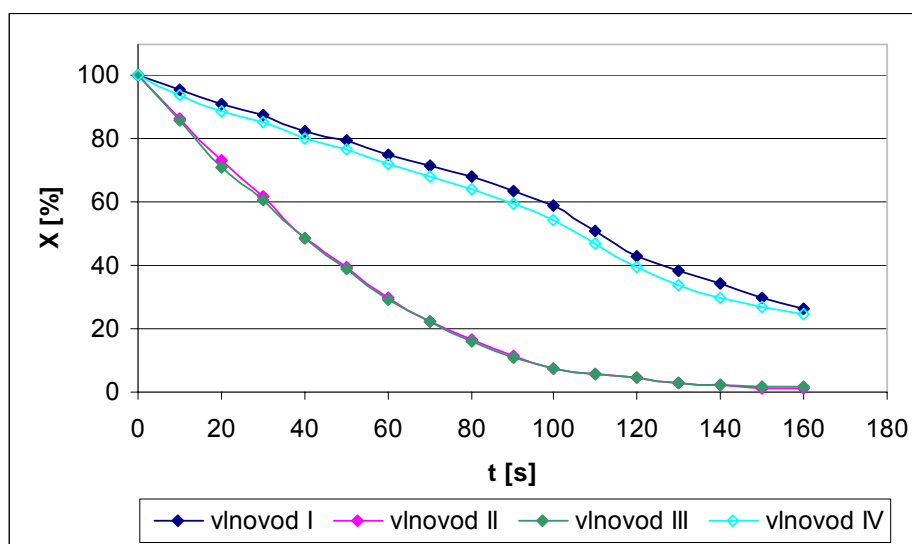
Obr. 6.25: Sušící křivka dosažená metodou B, při výkonu P10 na materiálu T_V

První maxima byla patrná u vlnovodů II a III v čase $t = 30$ s. U vlnovodů III a IV byla patrná v $t = 130$ s.

Měření při výkonu P5:

Tabulka 6.9: Hodnoty X [%] naměřené metodou B při výkonu P5 na materiálu T_v po čase $t = 160$ s

Vlnovod	I	II	III	IV
X [%]	26,62	1,27	1,55	24,51

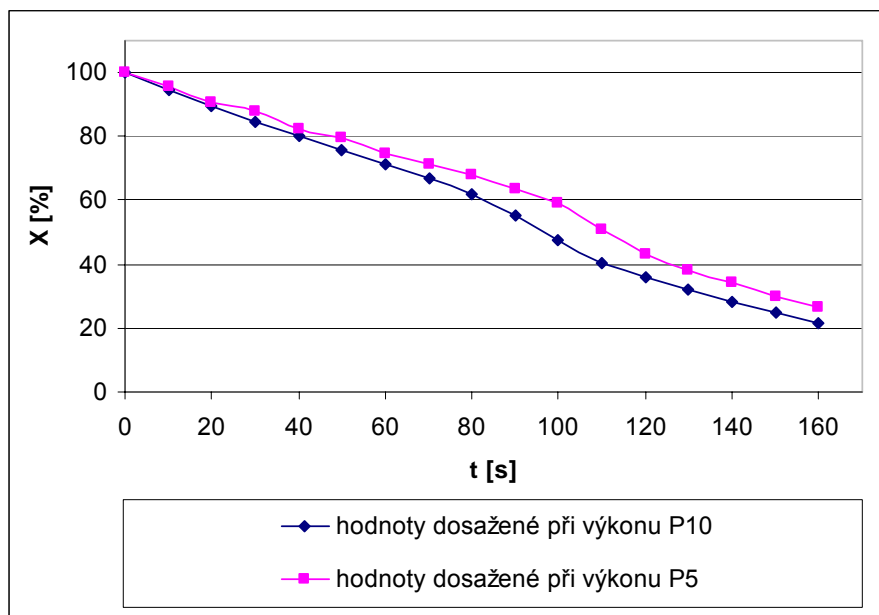


Obr. 6.26: Sušící křivka dosažená metodou B při výkonu P5 na materiálu T_v

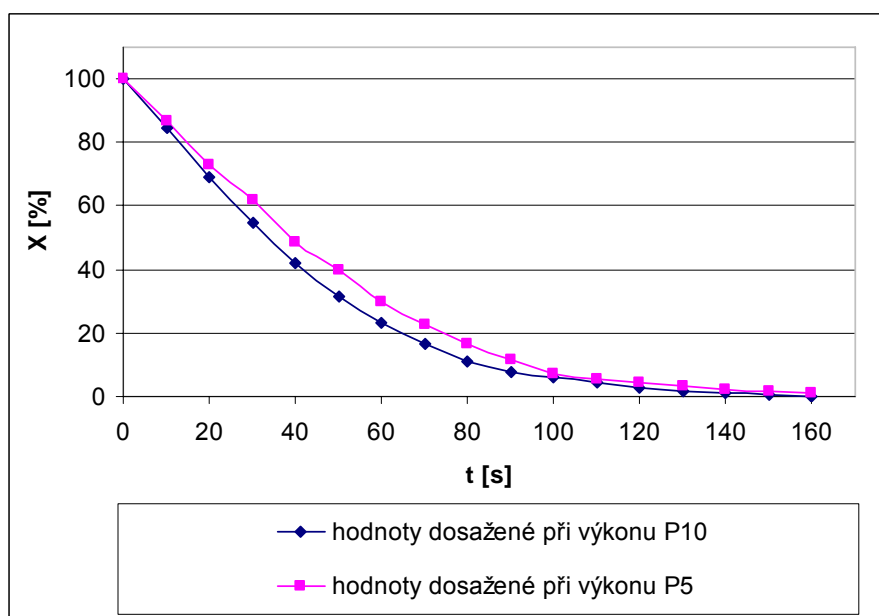
První maxima byla patrná u vlnovodů II a III v čase $t = 50$ s. U vlnovodů III a IV se projevila v $t = 140$ s.

Porovnání podle výkonů:

Na obrázcích 6.27 a 6.28 jsou znázorněny grafy závislosti vlhkosti na čase podle výkonů P10 a P5. Porovnání výkonů bylo provedeno pro hodnoty z vlnovodů I a II naměřené metodou B (ve vlnovodech III a IV byly dosaženy podobné hodnoty).



Obr. 6.27: Porovnání výkonů podle dosažených vlhkostí materiálu T_V metodou B ve vlnovodu I



Obr. 6.28: Porovnání výkonů podle dosažených vlhkostí materiálu T_V metodou B ve vlnovodu II

Stejně jako u materiálu T_N bylo dosaženo nejlepších hodnot při výkonu 100%. Při výkonu P10 bylo dosaženo ve vlnovodu II o 1,3 % nižší vlhkosti než u výkonu P5.

6.3.2 Hodnocení vysušení obrazovou analýzou

Hodnocení vlhkosti materiálu bylo zpracováno pomocí personálního počítače se softwarem obrazové analýzy Lucia G. Je to systém firmy Laboratory Imaging, který zpracovává a analyzuje barevný obraz na základě matematické morfologie, kde je analyzovaný objekt chápán jako množina bodů.

Tento program zpracovává dva druhy měření, objektové a texturální a dva základní typy obrazů, binární a barevný. Binární obraz je tvořen hodnotami 0 (hodnota pozadí) a 255 (objekty a struktury) a používá se pro měření tvaru (např. chlupatost přize) a velikostí (pórů apod.). Barevný obraz se skládá ze složek RGB, tedy intenzity červené, zelené a modré barvy, jejichž hodnota může být od 0 do 255 pixelů.

Pro naše účely bylo použito objektové měření barevného obrazu. Měření bylo prováděno na materiálu, který při namočení výrazně změnil odstín. Po vystavení mokrého materiálu působení mikrovln se postupně objevovala usušená místa, která byla výrazně světlejšího odstínu než místa mokrá. Materiál byl vyfotografován digitálním fotoaparátem, který byl umístěn na stativu.

Podle fotografií byl proveden odhad plochy pomocí softwaru Lucia G. Princip odhadu plochy spočívá v rozdělení objektu pravidelným bodovým rastrem. Podle rastru získáme počet bodů v objektu a po jejich vynásobení kalibrační konstantou (průměrná velikost bodů) získáme odhad plochy.

Při tomto měření byla provedena dvojice odhadů plochy pro každou fotografii. Nejprve byla rastrována usušená textilie. Byly vybrány plochy se světlým odstínem a objekt byl skenován. Takto byl získán *odhad plochy suchého materiálu*. Následně byl proveden *odhad celé plochy materiálu*. Byla nastavena co možná největší hustota rastru a objekt byl opět skenován.

Z hodnot plochy vzorku a suchého materiálu byla vypočtena vlhkost podle následujícího vztahu:

$$X_i = \frac{S_c - S_s}{S_c} \cdot 100 [\%], \quad (29)$$

kde S_c je celková plocha vzorku a S_s je plocha suchého materiálu.

Z těchto hodnot byla stanovena průměrná vlhkost \bar{X} podle vztahu:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} [\%], \quad (30)$$

kde X_i jsou hodnoty vypočítaných vlhkostí z jednotlivých fotografií a N je počet fotografií. V případě určení průměrné vlhkosti materiálu z hodnot naměřených vážením jsou X_i hodnoty vlhkostí v jednotlivých vlnovodech a N je počet vlnovodů.

V tabulkách 6.10 a 6.12 jsou uvedeny hodnoty získané pomocí obrazové analýzy, v tabulkách 6.11 a 6.13 získané metodou vážení.

Tabulka 6.10: Hodnoty získané obrazovou analýzou fotografií materiálu T_N při výkonu P10, v čase $t = 100s$, metodou B, vypočítané hodnoty X_i [%] a \bar{X} [%]

i	Měření plochy suchých míst			Měření celkové plochy materiálu			X_i [%]
	Počet bodů v objektu	Kalibrační konstanta	S_s [μm^2]	Počet bodů v objektu	Kalibrační konstanta	S_c [μm^2]	
1	6138	1,3913E+07	8,5398E+10	318	3,6090E+08	1,1477E+11	25,590
2	6380	1,4780E+07	9,4296E+10	240	4,7428E+08	1,1383E+11	17,158
3	9002	1,0080E+07	9,0740E+10	286	4,0000E+08	1,1440E+11	20,682
\bar{X} [%]							21,143

Tabulka 6.11: Hodnoty vlhkostí získané metodou vážení, materiálu T_N při výkonu P10, v čase $t = 100s$, metodou B, vypočítaná průměrná vlhkost \bar{X} [%]

vlnovod I	vlnovod II	vlnovod III	vlnovod IV	\bar{X} [%]
20,450	2,273	2,273	13,636	9,658

Tabulka 6.12: Hodnoty získané obrazovou analýzou fotografií materiálu T_N při výkonu P10, v čase $t = 80s$, metodou B, vypočítané hodnoty X_i [%] a \bar{X} [%]

Měření obsahu suché plochy				Měření celkového obsahu			
i	Počet bodů v objektu	Kalibrační konstanta	$S_s [\mu m^2]$	Počet bodů v objektu	Kalibrační konstanta	$S_c [\mu m^2]$	X_i [%]
1	12542	5,8893E+06	7,3864E+10	307	3,7662E+08	1,1562E+11	36,116
2	15857	4,0507E+06	6,4232E+10	411	2,7896E+08	1,1465E+11	43,977
3	12312	5,5176E+06	6,7933E+10	299	3,8191E+08	1,1419E+11	40,510
\bar{X} [%]							40,201

Tabulka 6.13: Hodnoty vlhkostí získané metodou vážení, materiálu T_N při výkonu P10, v čase $t = 80s$, metodou B, vypočítaná průměrná vlhkost \bar{X} [%].

vlnovod I	vlnovod II	vlnovod III	vlnovod IV	\bar{X} [%]
29,55	2,27	4,55	25,00	15,342

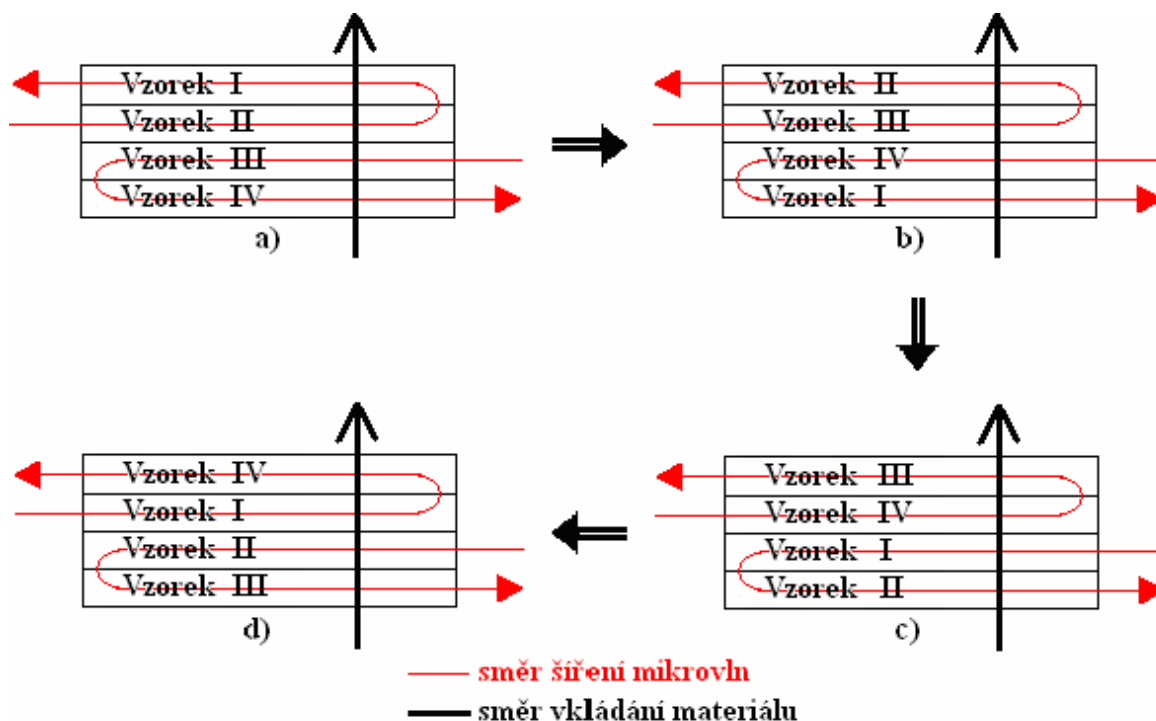
Hodnoty průměrné vlhkosti materiálu podle SW Lucie G neměly ani přibližný charakter hodnot získaných metodou vážení, dokonce byly odhadnuty na více než dvojnásobek. Evidentně byla tato metoda zvolena nevhodně a proto nebylo už dalšího určování vlhkosti touto metodou využito.

6.4 Simulace posunu materiálu

Vzhledem k tomu, že soustava nebyla opatřena posouvacím zařízením, byl posun pouze simulován, hodnoty jsou tedy pouze orientační. Pro dosažení homogenity bylo důležité, aby jednotlivé části zařízení na sebe navazovaly tak, aby na maxima vlnovodu III navazovala minima vlnovodu II. Zařízení bylo proto seřizeno, aby této podmínce vyhovovalo.

Posun materiálu byl simulován při počáteční vlhkosti 100%, přičemž nebylo úkolem dosáhnout vlhkosti 0%. Vysoušení na tuto hodnotu vlhkosti je značně neekonomické a navíc hrozí nebezpečí degradace materiálu. U většiny textilních materiálů je stanovena tzv. uzanční vlhkost. Udává množství vlhkosti obsažené v materiálu za běžných klimatických podmínek (např. u bavlny je její hodnota 8,5 %, u vlny 12%). Z tohoto důvodu vysoušení na

hodnotu vlhkosti 10% zcela postačuje. V průmyslovém sušení je vysušováno na hodnotu kolem 8%.



Obr. 6.29: Schéma rozložení materiálu při simulaci posunu

Simulace posunu byla provedena následujícím způsobem:

Polohy materiálu při posunu jsou znázorněny na obr. 6.29. Materiál byl rozdělen na čtyři vzorky o velikosti 80 x 410 mm. Ty pak byly namočené a položeny na rošt. Do zařízení byly vloženy v poloze *a*). V této byly vystaveny působení mikrovln, poté byly vyjmuty, posunuty do polohy *b*), vloženy do vlnovodů a opět vystaveny působení mikrovln. Tak bylo pokračováno až do polohy *d*).

Doba působení byla stanovena takto:

Doba působení byla odhadnuta podle sušících křivek. Hlavním kritériem byl čas, kdy se na materiálu objevila první vysušená maxima. Při klasickém průtahu prostupuje materiál zařízením konstantní rychlostí, tedy v každé části zařízení stráví stejnou časovou jednotku. Celková doba expozice, značena t_e , je tedy 4-násobek odhadu pro vlnovod II (popř. III).

Rychlost průtahu lze snadno vypočítat podle vztahu:

$$v = \frac{l}{t_c} \text{ [m/s]}, \quad (31)$$

kde l je délka sušeného materiálu, v tomto případě 0,32m a t_c celková doba expozice, tedy doba potřebná k projití materiálu zařízením.

Byla sledována změna hmotnosti každého vzorku zvlášť a pro každý byla vypočtena vlhkost. Z těchto hodnot byla stanovena průměrná vlhkost \bar{X} podle vztahu (31), kde X_i jsou hodnoty vlhkostí jednotlivých vzorků a N je počet vzorků (vlnovodů).

Parametry testu:

Použité výkony: P10, P5;

Materiály:

T_N – tkanina s nízkou plošnou hmotností –	Materiál: 100% Ba $\rho_s = 142 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ $\rho_v = 449,8 \text{ kg/m}^3$
T_V – tkanina s vysokou plošnou hmotností –	Materiál: 100% Ba $\rho_s = 217 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ $\rho_v = 429,5 \text{ kg/m}^3$

Během posunu materiálu byly ponechány otevřené oba kryty štěrbin, aby pára, odpařená z materiálu, mohla odcházet z prostoru vlnovodů.

6.4.1 Simulace posunu materiálu T_N

Posun materiálu při výkonu P10:

V tabulce 6.14 jsou uvedeny hodnoty X_i odpovídající jednotlivým částem vlnovodu, průměrná hodnota vlhkosti \bar{X} [%] a rychlost průtahu, který by byl nutný pro usušení materiálu na tyto hodnoty.

Tabulka 6.14: Hodnoty vlhkosti dosažené při posunu materiálu T_N při výkonu P10

t_c [s]	X_I [%]	X_{II} [%]	X_{III} [%]	X_{IV} [%]	\bar{X} [%]	v [m/s]
80	13,40	16,38	18,94	18,72	16,86	0,00400
100	4,55	9,96	8,66	10,61	8,44	0,00320
120	2,58	4,52	4,73	6,02	4,46	0,00267

První maxima, patrná ve vlnovodech II a III, se objevila po $t = 20$ s. Podle toho byla doba expozice odhadnuta na $t_c = 80$ s. Během experimentu bylo však zjištěno, že tato doba je nepostačující, proto byla doba postupně prodlužována, nejprve na $t_c = 100$ s a následně až na $t_c = 120$ s. Odhad podle kritéria maxim se ukázal jako nesprávný. Proto byly hodnoty při následujících experimentech upraveny. Při průmyslovém sušení by byla hodnota vlhkosti 8,44% postačující. V tomto případě by byla rychlost průtahu $v = 3,20 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Simulace posunu při *podmínkách průmyslového zpracování* plošných materiálů:

V klasických sušárnách je pomocí fulárů dosaženo vstupní vlhkosti od 60% (nejvýkonnější fuláry) do 85%. Nejčastěji je však možné se setkat s 80%-ní vstupní vlhkostí. Proto byly pro každý experiment provedeny ještě testy s počáteční vlhkostí 80%. Doba sušení byla, stejně jako v předešlém případě, přizpůsobena tomu, abychom dosáhli vlhkosti $8\% \pm 1\%$.

V tabulce 6.15 jsou uvedeny doba expozice t_c , vlhkost vzorků I-IV a průměrná vlhkost.

Tabulka 6.15: Hodnoty vlhkosti dosažené při posunu materiálu T_N při výkonu P10 s podmínkami průmyslového zpracování

t_c [s]	X_I [%]	X_{II} [%]	X_{III} [%]	X_{IV} [%]	\bar{X} [%]	v [m/s]
88	2,15	10,32	10,32	3,87	6,67	0,00364
80	5,16	12,90	13,55	7,31	9,73	0,00400
84	4,09	11,40	12,04	6,45	8,49	0,00381

Podle dříve dosažených hodnot \bar{X} byla doba expozice pro jednotlivé vlnovody stanovena na 22s, celková doba expozice tedy byla $t_c = 88s$. Hodnota vlhkosti dosažená po této době expozice byla zbytečně nízká, proto jsme expozici zvýšili na $t_c = 80s$. Hodnota blízka 10-ti procentům vlhkosti byla zase příliš vysoká, proto byl zvolen kompromis $t_c = 84s$. Po této době expozice jsme dosáhli hodnoty vlhkosti 8,49%, a rychlost průtahu by odpovídala hodnotě $v = 3,81 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Posun materiálu při výkonu P5:

V tabulce 6.17 jsou uvedeny hodnoty X_i dosažené při výkonu P5, které odpovídají jednotlivým částem vlnovodu. Dále pak průměrná hodnota vlhkosti \bar{X} [%] a rychlost průtahu, který by byl nutný pro usušení materiálu na tyto hodnoty.

Tabulka 6.16: Hodnoty vlhkosti dosažené při posunu materiálu T_N při výkonu P5 s podmínkami průmyslového zpracování

t_c [s]	X_I [%]	X_{II} [%]	X_{III} [%]	X_{IV} [%]	\bar{X} [%]	v [m/s]
140	30,75	26,45	31,40	31,61	30,05	0,00229
180	11,83	13,76	14,84	16,13	14,14	0,00178
220	8,60	11,18	12,47	13,76	11,51	0,00145
240	3,66	2,58	3,66	4,52	3,60	0,00133

První maxima, patrná ve vlnovodech II a III, se objevila po $t = 30\text{s}$. Podle předešlých zkušeností bylo zjištěno, že řídit se tímto kritériem nebylo správné. Proto byla tato hodnota upravena a bylo k ní přičteno ještě 5 vteřin. Celková doba expozice tedy byla stanovena na $t_c = 140\text{s}$. Následně byly hodnoty ještě prodlužovány na 180s, 220s a 240s. K dosažení vlhkosti blízké 8% by bylo potřeba asi 230s expozice při rychlosti průtahu asi $v = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Simulace posunu při *podmínkách průmyslového zpracování*:

Hodnoty vlhkostí a vypočtené průměrné vlhkosti jsou zaznamenány v tabulce 6.18.

Tabulka 6.18: Hodnoty vlhkosti dosažené při posunu materiálu T_N při výkonu P5 s podmínkami průmyslového zpracování

t_c [s]	X_I [%]	X_{II} [%]	X_{III} [%]	X_{IV} [%]	\bar{X} [%]	v [m/s]
180	1,29	12,26	11,26	4,73	7,47	0,00178

Podle dříve dosažených hodnot \bar{X} byla doba expozice pro jednotlivé vzorky materiálu stanovena na 45 s, celková doba expozice tedy byla $t_c = 180 \text{ s}$. Po této době expozice jsme dosáhli hodnoty vlhkosti 7,47 %, a rychlost průtahu by byla $v = 1,78 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

6.4.2 Simulace posunu materiálu T_V

Hodnoty dosažené při testech s materiálem o nízké plošné hmotnosti (T_N) při výkonu P5 byly pro další použití nepřijatelné. V každém procesu je hlavním kritériem ekonomická stránka. Při výkonu P5 by byl proces sušení zdlouhavý, což by s sebou také neslo větší náklady. Proto bylo, při použití materiálu T_V , provedeno měření pouze při výkonu P10.

Posun materiálu při výkonu P10:

V tabulce 6.19 jsou uvedeny hodnoty X_i dosažené při výkonu P10, které odpovídají jednotlivým částem vlnovodu. Dále pak průměrná hodnota vlhkosti \bar{X} [%] a rychlost průtahu, který by byl nutný pro usušení materiálu na tyto hodnoty.

Tabulka 6.19: Hodnoty vlhkosti dosažené při posunu materiálu T_V při výkonu P10 s podmínkami průmyslového zpracování

t_c [s]	X_I [%]	X_{II} [%]	X_{III} [%]	X_{IV} [%]	\bar{X} [%]	v [m/s]
120	13,43	10,49	14,27	13,43	12,90	0,00267
140	6,10	6,24	7,52	7,23	6,77	0,00229
160	1,26	1,82	5,45	1,12	2,41	0,00200

První maxima, patrná ve vlnovodech II a III, se objevila po $t = 40$ s. Celková doba expozice tedy byla stanovena na $t_c = 160$ s. Vzhledem k tomu, že bylo dosaženo vlhkosti pouhých 2,41%, byla doba expozice upravena na $t_c = 140$ s a následně ještě snížena na $t_c = 120$ s. Požadovaná vlhkost cca 8% by byla dosažena při $t_c \approx 130$ s.

Simulace posunu pro využití v *průmyslovém zpracování* plošných materiálů:

Stejně jako u materiálu T_N byl proveden experiment s počáteční vlhkostí 80% a doba sušení byla přizpůsobena tomu, abychom dosáhli vlhkosti $8\% \pm 1\%$. V tabulce 6.20 jsou uvedeny dosažené hodnoty.

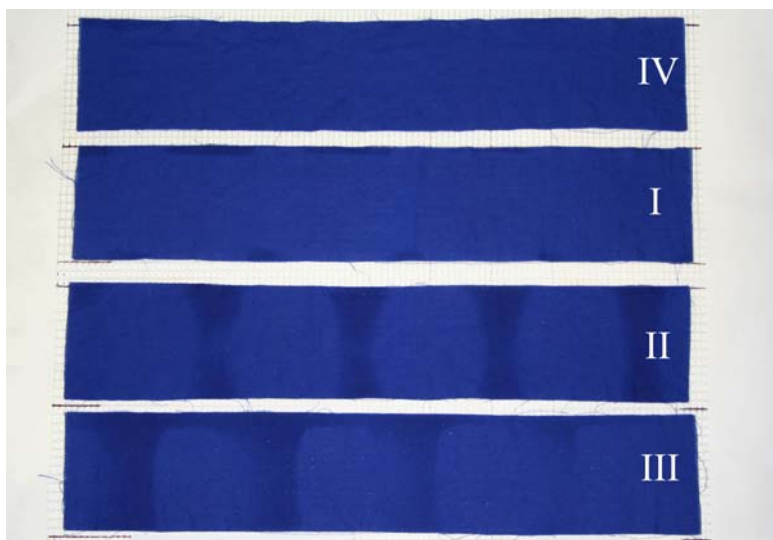
Tabulka 6.20: Hodnoty vlhkosti naměřené po době expozice $t_c = 84s$, při výkonu P10 na materiálu T_N

t_c [s]	X_I [%]	X_{II} [%]	X_{III} [%]	X_{IV} [%]	\bar{X} [%]	v [m/s]
100	12,34	10,50	13,33	13,19	12,34	0,00320
120	5,53	7,66	6,67	5,96	6,45	0,00267

Podle dříve dosažených hodnot \bar{X} byla doba expozice pro jednotlivé vlnovody stanovena na 25s, celková doba expozice tedy byla $t_c = 100s$. Po této době expozice jsme dosáhli hodnoty vlhkosti přes 12 %, proto byla doba expozice ještě navýšena a to na 120s. Po této době bylo dosaženo usušení na 6,45% a rychlost průtahu by byla $v = 2,67 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Hodnoty vlhkosti jednotlivých vzorků, získaných výkonem P10 i P5, u obou materiálů jsou značně rozdílné. Je to způsobeno závislostí vzorku na tom, v jaké poloze se nacházel a kolik energie k němu v dané pozici prošlo.

Dále je z obrázku 6.30 patrné, že i po projití materiálu všemi polohami bylo usušení značně nehomogenní. Je to způsobeno tím, že svazek mikrovln je směřován do středu vlnovodu. Směrem ke stranám vlnovodu se počet vln ve svazku snižuje. Proto mají usušená místa spíše elipsovité tvar. Je tedy evidentní, že touto simulací nelze dosáhnout homogenního vysoušení. Oba tyto jevy by však měly být odstraněny, pokud bude soustava opatřena posunovacím zařízením.



Obr. 6.30: Fotografie materiálu T_N po simulaci posunu při výkonu P10

6.5 Leptový tisk

Leptový tisk se používá na textilie již vybarvené takovým barvivem, které lze odbarvit. Princip je poměrně jednoduchý. Na obarvenou textilií je nanášena leptací pasta, u které proběhnou při paření (popř. horkovzdušném zpracování) chemické reakce. Ty zapříčiní, že na potištěných místech se barvivo, kterým byla textilie dříve obarvena, rozloží a vznikne tak bílý lept.

Použitý materiál: 100% Ba, plátňová vazba

$$\rho_s = 150 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$$

$$\rho_v = 408,652 \text{ kg/m}^3$$

V našem případě bylo působení páry nahrazeno působením mikrovln. Paření probíhá při teplotě cca 103°C po dobu minimálně 10min. Teplotu kolem 100°C v zařízení nemůžeme zaručit. Předpokládá se však, že voda obsažená v pastě se bude při této teplotě vypařovat. Aby byl dodržen čas paření, bylo použito výkonu P3. Při tomto výkonu bylo možno materiál ponechat v zařízení po dobu 10 min. bez nebezpečí degradace materiálu a s dostatečnou zbytkovou vlhkostí potřebnou pro fixaci.

Postup experimentu byl následující:

Pro experiment bylo připraveno 47,9 g leptací pasty. Ta byla natištěna na bavlněnou obarvenou tkaninu pomocí šablony se vzorem. Tkanina byla umístěna do zařízení a vystavena působení mikrovln při výkonu P3. Stejně jako při simulaci posunu materiálu byla tkanina po $\frac{1}{4} t_c$ posouvána. Po uplynutí celkové doby expozice byla vyjmuta a následovala kondenzace horkým vzduchem při teplotě 150°C po dobu 5min. Po fixaci byla tkanina vyprána v lázni při teplotě 40°C. Složení leptací pasty a lázně je uvedeno v tabulce 6.21.

Tabulka 6.21: Složení leptací pasty a prací lázně

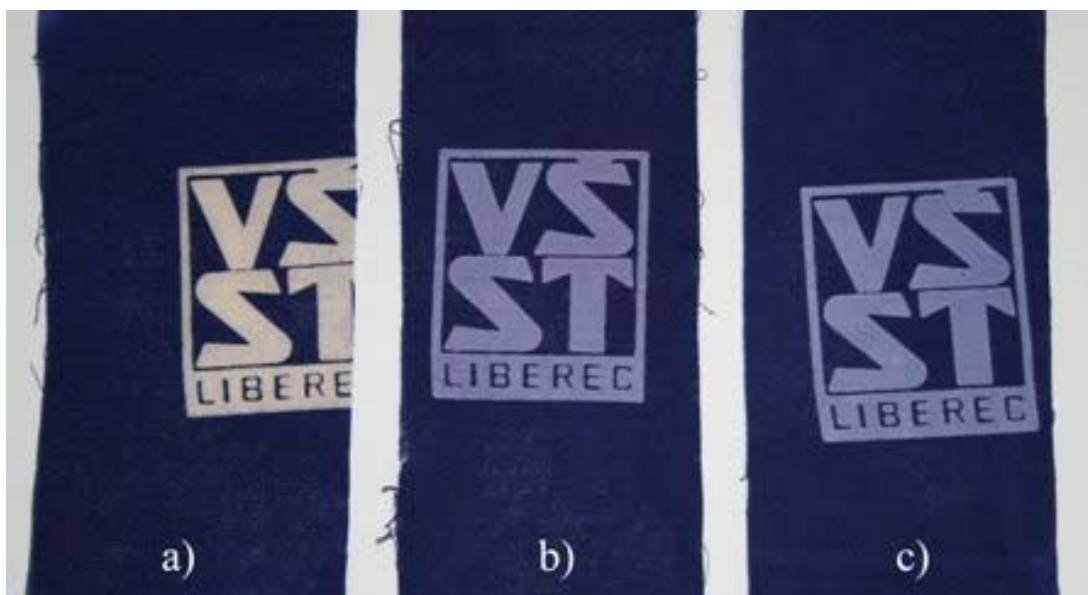
Leptací pasta		Lázeň	
700 g	alginátová záhustka (4 % Manutex RS)	2 g.l-1	Syntapon ABA
150 g	Sokrat 4924 (pojídlo)	5 g.l-1	peroxid vodíku
100 g	Leptacit C (redukční prostředek)	1 g.l-1	kyselina octová

Aby bylo možné zhodnotit účinnost tohoto pokusu, bylo nutné vyhotovit ještě další vzorky, na které ale byly použity jiné reakční operace. V tabulce 6.14 je schématicky naznačeno jaké operace byly použity, navíc je zde pro porovnání i schématický popis námi použitého postupu (*b*)).

Tabulka 6.22: Druhy použitých postupů při aplikaci leptového tisku

pořadí operace	a)	b)	c)
1	tisk	tisk	tisk
2	sušení ($t = 15 \text{ min.}$, $T = 60^\circ\text{C}$)	mikrovlnné záření ($t = 10 \text{ min.} = 4 \times 150\text{s}$)	sušení ($t = 15 \text{ min.}$, $T = 60^\circ\text{C}$)
3	paření ($t = 10 \text{ min.}$, $T = 100^\circ\text{C}$)		
4	fixace ($t = 5 \text{ min.}$, $T = 150^\circ\text{C}$)	fixace ($t = 5 \text{ min.}$, $T = 150^\circ\text{C}$)	fixace ($t = 5 \text{ min.}$, $T = 150^\circ\text{C}$)

Na vzorek *a*) byl aplikován klasický průmyslový postup leptového tisku. U vzorku *b*) bylo sušení a paření nahrazeno mikrovlnným zářením a na vzorku *c*) nebylo použito žádného reakčního procesu, byl pouze usušen a zafixován.



Obr. 6.31: Fotografie materiálů po aplikaci leptového tisku

Jak je patrné z obrázku 6.31, při použití standardního postupu *a*) byla barva vyleptána úplně. Použití mikrovlnného záření *b*), po dobu $t = 10 \text{ min}$ a při teplotě maximálně 100°C ,

je srovnatelné s metodou, kdy nebylo použito žádného reakčního procesu a materiál byl pouze sušen při $T = 60^{\circ}\text{C}$ a po dobu $t = 15$ min.

Za podmínek tohoto testu tedy nebyl požadovaný efekt dosažen. Otázkou zůstává, zda by pro použití v mikrovlnné sušičce nebylo vhodnější použít jiného složení leptací pasty. Za úvahu také stojí, jak by výsledek ovlivnil přidavek nějaké chemikálie do leptací pasty, která by na sebe vážala vodu. Zvýšením obsahu vody v leptací pastě by se zvýšil obsah vody v materiálu a bylo by tedy absorbováno více mikrovlnné energie právě v místě tisku.

7. Závěr

Na základě zadání byla ověřena funkčnost prototypu mikrovlnné sušičky plošných útvarů. Experimenty, provedené za tímto účelem nám poskytly informace o tom, zda zařízení funguje podle předpokladů a jak se materiál uvnitř soustavy chová. Navíc bylo při experimentech odhaleno, jak tomu u prototypů bývá, mnoho nedostatků.

Přestože byl systém konstruován s podmínkou maximální bezpečnosti, bylo ověřeno, že k únikům elektromagnetického záření dochází. Mapováním polí bylo potvrzeno, že simulace průběhu intenzit elektromagnetického pole, navržená programem CST Microwave Studio, přibližně odpovídá tepelným polím, získaným infračervenou kamerou. Měřením na silné netkané textilií bylo prokázáno, že čím je tloušťka materiálu větší, tím je mikrovlnná energie více pohlcována.

Pro potřeby dalších experimentů byly stanoveny sušící křivky pro dvě tkaniny rozdílných plošných hmotností, při různých výkonech magnetronů. Bylo sledováno chování materiálu v každé části zařízení zvlášť a bylo tedy možné vypořádat, zda jsou jednotky soustavy totožné a pracují se stejnou účinností. Toto nebylo prokázáno. Nevyváženost může být způsobena nedokonalostí vlnovodů způsobené při výrobě.

Také byla provedena simulace posunu. Hodnoty vlhkostí jednotlivých vzorků byly značně rozdílné, mimo to po projití vzorku všemi polohami, nebylo usušení homogenní a usušená místa měla elipsovitý tvar.

Pokus s využitím zařízení pro finální úpravy byl aplikován na leptový tisk. Požadovaný efekt sice nebyl dosažen, ale s využitím získaných poznatků lze tento experiment dále rozvinout.

Pro další experimenty a měření na tomto zařízení by bylo potřeba zjištěné nedostatky vyřešit. Bylo by vhodné štěrby pro vkládání materiálu opatřit buď vhodnějším krytem, nebo k nim umístit tlumivky, které by vyzářující energii pohltily.

Dále pak opatřit soustavu posunovacím zařízením, které by zajistilo homogenitu vysoušení. Mimo to by byl vyřešen problém vkládání materiálu. Deska vyrobená ze sklovláknité mřížky, vyztužená po krajích plexisklem, nemá dostatečnou pevnost a vkládání materiálu je značně nepohodlné a zdlouhavé.

V neposlední řadě je třeba vyřešit odvod vlhkosti z prostoru vlnovodů. Další experimenty, prováděné na tomto zařízení, tím budou urychleny a výsledky bude možné relevantně porovnat s průmyslovými aplikacemi, kde je odvod par běžný.

Problém nevyváženosti soustavy způsobené výrobou není nutné ve fázi prvotních experimentů řešit, ale pro uvedení principu do praxe bude vyváženost nezbytná.

Pro reálné použití zařízení v některé z průmyslových aplikací, je nutné, aby byla zjištěna účinnost zařízení a energetická náročnost. Teprve potom bude možné zjistit, zda je zařízení ekonomicky výhodné.

Zařízení se nalézá prozatím ve fázi prototypu, je tedy těžké usuzovat na jeho další využití. Některá omezení jsou však evidentní už nyní.

Princip mikrovlnného ohřevu ve vlnovodu je možné využít pouze pro ohřev plošných útvarů. V textilním průmyslu je tato forma běžná, a proto není forma útvaru omezující. V průmyslových odvětvích, kde by ohříváný objekt neměl plošný tvar, však toto omezení může způsobovat problémy a tento princip by v nich nenašel uplatnění.

Při průmyslovém sušení je rychlost procesu, z ekonomického hlediska, rozhodující. Rychlost mikrovlnného sušení tímto principem byla, i při plném výkonu magnetronu, velmi nízká. Proto je jeho využití pro průmyslové sušení prozatím nevýhodné. Alespoň do té doby, dokud nedojde ke konstrukčním úpravám a zdokonalení celé konstrukce, která je stále ve vývoji.

Zdroje:

- [1] Sedlák, B.; Štoll, I.: Elektřina a magnetismus, Academia, Praha 2002
- [2] Vrba, J.: Studie mikrovlnného ohřevu pomocí postupné vlny, Výzkumná zpráva, TUL Liberec VCT II., FEL, ČVUT Praha, 2005
- [3] Turek, B.: Experimentální pracoviště pro ověření vlivu vysokofrekvenčního elektromagnetického pole v textilní technologii, diplomová práce, KEL, FM, TUL 2003, Liberec
- [4] Dvořáková, D.: Možnosti použití vysokofrekvenčního elektromagnetického pole v textilní technologii, diplomová práce, KEL, FM, FT, TUL 2003, Liberec
- [5] Truhlář, M.; Novák, P.: Mikrovlnný ohřev plošných útvarů pomocí stojaté vlny ve vlnovodu, FM, TUL, 2006
- [6] Žák O. : Vlnododový aplikátor pro vysoušení textilních materiálů, Diplomová práce, ČVUT Praha 2005
- [7] Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.: Fyzika, Vysoké učení technické v Brně, 2000
- [8] Mayer D.: Teorie elektromagnetického pole, 2.díl, Západočeská univerzita v Plzni, 2004
- [9] Truhlář, M.: , Diplomová práce, FM, TUL 2007, Liberec
- [10] Šindelář, J.: Integrační měřič záření, Diplomová práce, FM, TUL 2004, Liberec

Internetové zdroje:

- [11] <http://www.e-builds.com/EM%20spectrum/> (20.3.2007)
- [12] http://if.vsb.cz/Kontakt/Hlavacova/elmg_zareni.doc (25.2.2007)
- [13] <http://www-ik.fzk.de/~bluemer/Vorlesungen/InfTMath/P1/interessant/em-spektrum-Tipler.jpg> (29.1.2007)
- [14] http://www.labo.cz/mft/rad_pasma.htm (2.2.2007)
- [15] <http://www.romill.cz> (19.2.2007)
 - [15a] http://www.romill.cz/index.php?lang=cze&show_dir=37
 - [15b] http://www.romill.cz/index.php?lang=cze&show_dir=71
- [16] <http://www.microwaves101.com> (2.3.2007)
 - [16a] <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/permittivity.cfm>
- [17] <http://rfprop.com/tep/rovinna%20vlna%20ve%20volnem%20prostoru/rovina%20vlna%20ve%20volnem%20prostoru.htm> (8.1.2007)

- [18] <http://www.cem.de> (30.3.2007)
- [18a] <http://www.cem.de/index.html?http://www.cem.de/documents/theorie/materialien.htm>
- [19] http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_13_maxw.pdf (15.3.2007)
- [20] <http://www.anton-paar.com> (3.3.2007)
- [20a] <http://www.anton-paar.com/ap/apinternet/html/default/cmse-698dgg.en.0.jsp>
- [20b] <http://www.anton-paar.com/ap/apinternet/html/default/cmse-699cg3.en.0.jsp>
- [21] http://www.chemagazin.cz/Texty/CHXV_1_cl1.pdf (1.2.2007)
- [22] <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/5.2.html#2> (21.2.2007)
- [23] http://www.kchsz.sjf.stuba.sk/pedagogika/Ucebnice/Procesne_strojnictvo/3.doc
(15.2.2007)
- [24] <http://www.vscht.cz/sch/www321/7T.html> (15.3.2007)
- [25] <http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/mikrov/podr1.htm> (19.2.2007)
- [26] <http://www.answers.com/topic/cavity-magnetron> (17.1.2007)
- [27] <http://www.gallawa.com/microtech/magnetron.html> (17.1.2007)
- [28] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/waves/magnetron.html> (17.1.2007)
- [29] <http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx08.en.html> (17.1.2007)
- [30] http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/programs/magnetic/rect/RectWave_files/image002.jpg (19.1.2007)
- [31] http://www.atmmicrowave.com/images/Transition_grp.jpg (19.1.2007)
- [32] <http://www.skyfly.cz/zajimavo/mwucinky04.htm> (22.3.2007)
- [33] <http://www.crk.cz/CZ/HYGNARC.HTM> (22.3.2007)

Hodnoty reálné a imaginární složky permitivit použitých materiálů v závislosti na frekvenci:*Materiály použité při zjišťování tepelných polí:*

Netkaná textilie NT – materiál: 100% PES
 $\rho_s = 316 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$

Bohužel vzhledem k velké tloušťce materiálu (v nezatíženém stavu cca 10 mm) nebylo možné hodnotu permitivity změřit.

Tkanina T – materiál: 100% Ba, plátňová vazba
 $\rho_s = 139 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
 $\rho_v = 400,288 \text{ kg/m}^3$

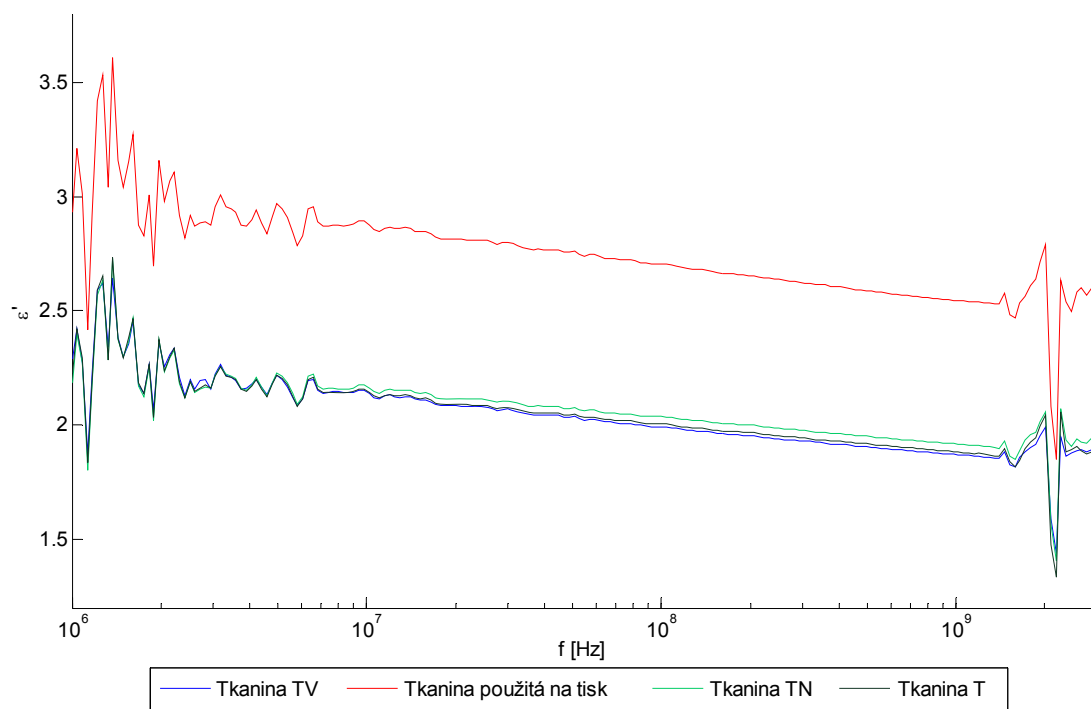
Materiály použité při zjišťování sušících křivek:

Tkanina T_N – materiál: 100% Ba, plátňová vazba
 $\rho_s = 142 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
 $\rho_v = 449,8 \text{ kg/m}^3$

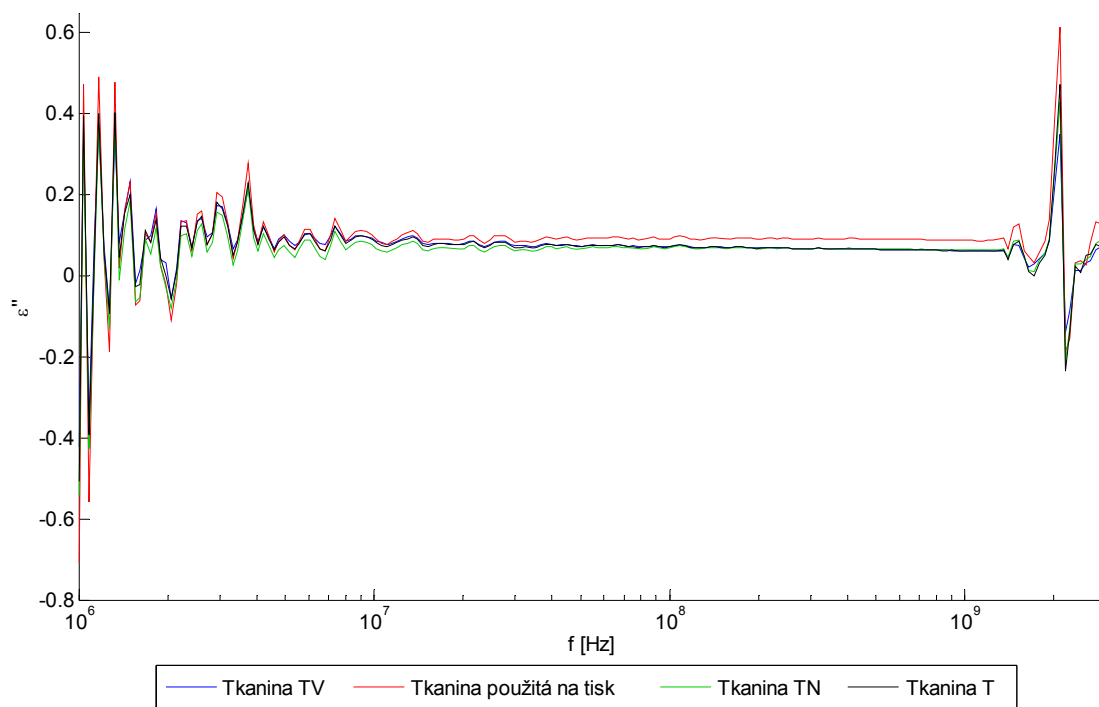
Tkanina T_V – materiál: 100% Ba, keprová vazba
 $\rho_s = 217 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
 $\rho_v = 429,5 \text{ kg/m}^3$

Materiál použitý při experimentu s leptovým tiskem:

Tkanina T_{tisk} – materiál: 100% Ba, plátňová vazba
 $\rho_s = 150 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
 $\rho_v = 408,652 \text{ kg/m}^3$



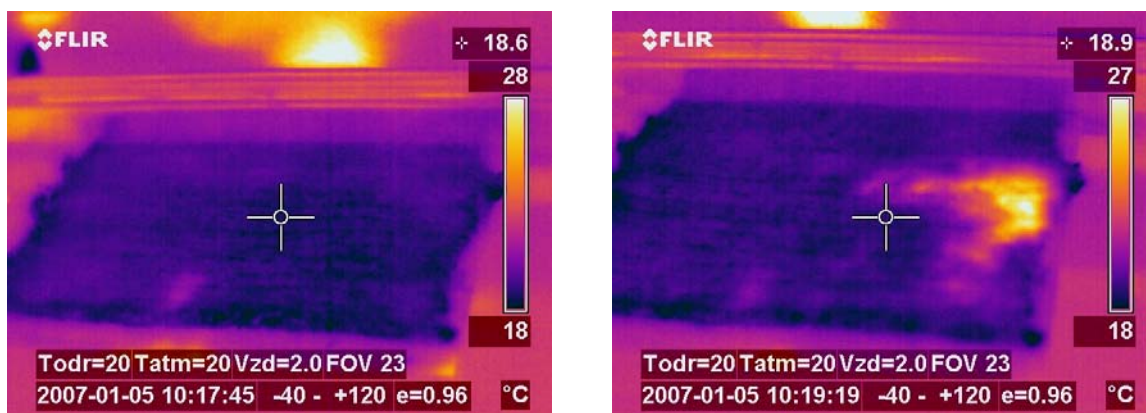
Obr. A.1: Hodnoty reálné části permitivity v závislosti na frekvenci pro materiály použité při experimentech



Obr. A.2: Hodnoty imaginární části permitivity v závislosti na frekvenci pro materiály použité při experimentech

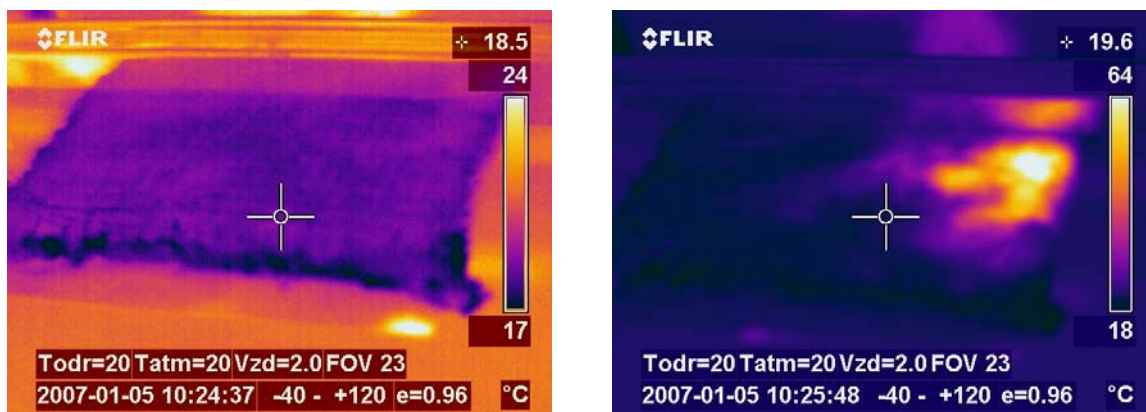
Mapování tepelných polí:

Snímky pořízené před zapájením šterbin a před poruchou první části zařízení.



Obr. B.1: NT před a po ohřevu v 1. části zařízení před jeho úpravou,
při výkonu P1, $t = 30s$

Teplota materiálu před ohřevem byla cca 18,6 °C, po ohřevu bylo při ústí aplikátoru patrné ohřátí na teplotu 27°C.



Obr. B.2: NT před a po ohřevu v 1. části zařízení před jeho úpravou,
při výkonu P5, $t = 30s$

Materiál měl před ohřevem teplotu cca 18,5°C, po ohřevu bylo při ústí aplikátoru patrné ohřátí na teplotu 64°C.

Naměřené hodnoty pro stanovení sušících křivek:

Tab. C.1: Naměřené hodnoty hmotností a vypočtené vlhkosti při stanovení sušících křivek materiálu TN, při výkonu P10, použita metoda A

t [s]	m ₀ [g]	m _{VI} [g]	m _{VII} [g]	m _{VIII} [g]	m _{IV} [g]	X _I [%]	X _{II} [%]	X _{III} [%]	X _{IV} [%]
0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	100,00	100,00	100,00	100,00
10		4,1	3,3	3,3	4	93,18	75,00	75,00	90,91
20		4	2,4	2,3	3,9	90,91	54,55	52,27	88,64
30		3,8	1,6	1,6	3,8	86,36	36,36	36,36	86,36
40		3,5	1,1	1,2	3,5	79,55	25,00	27,27	79,55
50		3,1	0,9	0,9	3,05	70,45	20,45	20,45	69,32
60		2,55	0,6	0,75	2,45	57,95	13,64	17,05	55,68
70		2,2	0,5	0,6	2,1	50,00	11,36	13,64	47,73
80		1,9	0,35	0,45	1,9	43,18	7,95	10,23	43,18
90		1,85	0,3	0,3	1,8	42,05	6,82	6,82	40,91
100		1,7	0,3	0,3	1,7	38,64	6,82	6,82	38,64

Tab. C.2: Naměřené hodnoty hmotností a vypočtené vlhkosti při stanovení sušících křivek materiálu TN, při výkonu P10, použita metoda B

t [s]	m ₀ [g]	m _{VI} [g]	m _{VII} [g]	m _{VIII} [g]	m _{IV} [g]	X _I [%]	X _{II} [%]	X _{III} [%]	X _{IV} [%]
0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	100,00	100,00	100,00	100,00
10		3,9	3,1	3,1	4	88,64	70,45	70,45	90,91
20		3,6	2,2	2,2	3,6	81,82	50,00	50,00	81,82
30		3,3	1,5	1,5	3,1	75,00	34,09	34,09	70,45
40		2,8	0,9	1	2,4	63,64	20,45	22,73	54,55
50		2,25	0,6	0,7	1,9	51,14	13,64	15,91	43,18
60		1,9	0,4	0,4	1,6	43,18	9,09	9,09	36,36
70		1,6	0,2	0,2	1,3	36,36	4,55	4,55	29,55
80		1,3	0,1	0,2	1,1	29,55	2,27	4,55	25,00
90		1,1	0,1	0,1	0,9	25,00	2,27	2,27	20,45
100		0,9	0,1	0,1	0,6	20,45	2,27	2,27	13,64
110		0,7	0	0,05	0,5	15,91	0,00	1,14	11,36

Tab. C.3: Naměřené hodnoty hmotností a vypočtené vlhkosti při stanovení sušících křivek materiálu TN, při výkonu P5, použita metoda A

t [s]	m ₀ [g]	m _{VI} [g]	m _{VII} [g]	m _{VIII} [g]	m _{IV} [g]	X _I [%]	X _{II} [%]	X _{III} [%]	X _{IV} [%]
0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	100,00	100,00	100,00	100,00
10		4,25	3,5	3,5	4,2	96,59	79,55	79,55	95,45
20		4,2	3,45	3,48	4,16	95,45	78,41	79,09	94,55
30		4,12	2,85	2,88	4,03	93,64	64,77	65,45	91,59
40		4,06	2,44	2,48	3,95	92,27	55,45	56,36	89,77
50		3,94	2,16	2,27	3,94	89,55	49,09	51,59	89,55
60		3,91	1,75	1,87	3,75	88,86	39,77	42,50	85,23
70		3,89	1,65	1,68	3,73	88,41	37,50	38,18	84,77
80		3,74	1,3	1,42	3,66	85,00	29,55	32,27	83,18
90		3,72	1,22	1,26	3,64	84,55	27,73	28,64	82,73
100		3,65	1,07	1,09	3,49	82,95	24,32	24,77	79,32
110		3,51	0,91	0,89	3,37	79,77	20,68	20,23	76,59

Tab. C.4: Naměřené hodnoty hmotností a vypočtené vlhkosti při stanovení sušících křivek materiálu TN, při výkonu P5, použita metoda B

t [s]	m ₀ [g]	m _{VI} [g]	m _{VII} [g]	m _{VIII} [g]	m _{IV} [g]	X _I [%]	X _{II} [%]	X _{III} [%]	X _{IV} [%]
0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	100,00	100,00	100,00	100,00
10		3,95	3,35	3,38	3,89	94,05	79,76	80,48	92,62
20		3,71	2,61	2,65	3,63	88,33	62,14	63,10	86,43
30		3,43	2,02	2,05	3,34	81,67	48,10	48,81	79,52
40		3,14	1,56	1,6	3,06	74,76	37,14	38,10	72,86
50		2,75	1,18	1,24	2,62	65,48	28,10	29,52	62,38
60		2,44	0,84	0,9	2,25	58,10	20,00	21,43	53,57
70		2,17	0,58	0,63	2	51,67	13,81	15,00	47,62
80		1,95	0,4	0,43	1,76	46,43	9,52	10,24	41,90
90		1,75	0,29	0,3	1,56	41,67	6,90	7,14	37,14
100		1,55	0,2	0,22	1,35	36,90	4,76	5,24	32,14
110		1,37	0,12	0,15	1,17	32,62	2,86	3,57	27,86

Tab. C.5: Naměřené hodnoty hmotností a vypočtené vlhkosti při stanovení sušících křivek materiálu TN, při výkonu P3, použita metoda A

t [s]	m ₀ [g]	m _{VI} [g]	m _{VII} [g]	m _{VIII} [g]	m _{IV} [g]	X _I [%]	X _{II} [%]	X _{III} [%]	X _{IV} [%]
0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	100,00	100,00	100,00	100,00
10		4,11	3,83	3,79	4,01	97,86	91,19	90,24	95,48
20		4,05	3,82	3,81	3,98	96,43	90,95	90,71	94,76
30		3,98	3,57	3,53	3,98	94,76	85,00	84,05	94,76
40		3,97	3,21	3,34	3,96	94,52	76,43	79,52	94,29
50		3,95	3,19	3,33	3,91	94,05	75,95	79,29	93,10
60		3,93	2,95	3	3,87	93,57	70,24	71,43	92,14
70		3,92	2,92	2,99	3,92	93,33	69,52	71,19	93,33
80		3,87	2,61	2,81	3,85	92,14	62,14	66,90	91,67
90		3,79	2,63	2,6	3,77	90,24	62,62	61,90	89,76
100		3,79	2,44	2,55	3,79	90,24	58,10	60,71	90,24
110		3,77	2,21	2,26	3,73	89,76	52,62	53,81	88,81

Tab. C.6: Naměřené hodnoty hmotností a vypočtené vlhkosti při stanovení sušících křivek materiálu TN, při výkonu P3, použita metoda B

t [s]	m ₀ [g]	m _{VI} [g]	m _{VII} [g]	m _{VIII} [g]	m _{IV} [g]	X _I [%]	X _{II} [%]	X _{III} [%]	X _{IV} [%]
0	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	100,00	100,00	100,00	100,00
10		4,10	3,90	3,90	4,10	93,18	88,64	88,64	93,18
20		4,00	3,50	3,50	3,90	90,91	79,55	79,55	88,64
30		3,70	3,10	3,10	3,60	84,09	70,45	70,45	81,82
40		3,56	2,80	2,84	3,50	80,91	63,64	64,55	79,55
50		3,40	2,40	2,50	3,20	77,27	54,55	56,82	72,73
60		3,20	2,20	2,25	3,05	72,73	50,00	51,14	69,32
70		3,00	1,90	2,00	2,80	68,18	43,18	45,45	63,64
80		2,80	1,60	1,70	2,50	63,64	36,36	38,64	56,82
90		2,60	1,25	1,45	2,30	59,09	28,41	32,95	52,27
100		2,30	1,07	1,05	2,10	52,27	24,32	23,86	47,73
110		2,10	0,91	0,84	1,90	47,73	20,68	19,09	43,18

Tab. B.7: Naměřené hodnoty hmotností a vypočtené vlhkosti při stanovení sušících křivek materiálu TV, při výkonu P10, použita metoda B

t [s]	m ₀ [g]	m _{VI} [g]	m _{VII} [g]	m _{VIII} [g]	m _{IV} [g]	X _I [%]	X _{II} [%]	X _{III} [%]	X _{IV} [%]
0	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	100,00	100,00	100,00	100,00
10		6,71	5,99	5,77	6,54	94,51	84,37	81,27	92,11
20		6,35	4,91	4,63	6,22	89,44	69,15	65,21	87,61
30		6,01	3,89	3,69	5,86	84,65	54,79	51,97	82,54
40		5,70	3,00	2,82	5,50	80,28	42,25	39,72	77,46
50		5,37	2,25	2,07	5,13	75,63	31,69	29,15	72,25
60		5,08	1,65	1,52	4,84	71,55	23,24	21,41	68,17
70		4,74	1,16	1,06	4,50	66,76	16,34	14,93	63,38
80		4,39	0,80	0,71	4,10	61,83	11,27	10,00	57,75
90		3,93	0,56	0,47	3,66	55,35	7,89	6,62	51,55
100		3,36	0,43	0,35	3,06	47,32	6,06	4,93	43,10
110		2,87	0,32	0,24	2,52	40,42	4,51	3,38	35,49
120		2,54	0,21	0,15	2,18	35,77	2,96	2,11	30,70
130		2,26	0,13	0,10	1,91	31,83	1,83	1,41	26,90
140		2,00	0,06	0,04	1,66	28,17	0,85	0,56	23,38
150		1,76	0,02	0,01	1,42	24,79	0,28	0,14	20,00
160		1,55	0	0	1,23	21,83	0,00	0,00	17,32

Tab. C.8: Naměřené hodnoty hmotností a vypočtené vlhkosti při stanovení sušících křivek materiálu TV, při výkonu P5, použita metoda B

t [s]	m ₀ [g]	m _{VI} [g]	m _{VII} [g]	m _{VIII} [g]	m _{IV} [g]	X _I [%]	X _{II} [%]	X _{III} [%]	X _{IV} [%]
0	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	100,00	100,00	100,00	100,00
10		6,80	6,16	6,09	6,67	95,77	86,76	85,77	93,94
20		6,45	5,19	5,06	6,31	90,85	73,10	71,27	88,87
30		6,23	4,39	4,32	6,07	87,75	61,83	60,85	85,49
40		5,84	3,47	3,45	5,68	82,25	48,87	48,59	80,00
50		5,64	2,81	2,76	5,45	79,44	39,58	38,87	76,76
60		5,31	2,13	2,08	5,12	74,79	30,00	29,30	72,11
70		5,08	1,59	1,57	4,85	71,55	22,39	22,11	68,31
80		4,84	1,19	1,15	4,55	68,17	16,76	16,20	64,08
90		4,52	0,81	0,79	4,25	63,66	11,41	11,13	59,86
100		4,18	0,52	0,52	3,87	58,87	7,32	7,32	54,51
110		3,63	0,41	0,40	3,33	51,13	5,77	5,63	46,90
120		3,06	0,32	0,33	2,79	43,10	4,51	4,65	39,30
130		2,72	0,22	0,22	2,39	38,31	3,10	3,10	33,66
140		2,43	0,15	0,18	2,12	34,23	2,11	2,54	29,86
150		2,11	0,10	0,13	1,90	29,72	1,41	1,83	26,76
160		1,89	0,09	0,11	1,74	26,62	1,27	1,55	24,51